

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Marcos Antonio Justi

**AUTOMATIZAÇÃO DO CONTROLE DE PROCESSO
DE REFUSÃO DE SOLDA “LEAD FREE” EM UMA
LINHA DE PRODUÇÃO “SMD”**

Taubaté – SP
2009

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Marcos Antonio Justi

**AUTOMATIZAÇÃO DO CONTROLE DE PROCESSO
DE REFUSÃO DE SOLDA “LEAD FREE” EM UMA
LINHA DE PRODUÇÃO “SMD”**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação Industrial e Robótica.

Orientador: Prof. José Carlos Lombardi

Co-orientador: Prof. Francisco Carlos P. Bizarria.

Taubaté – SP
2009

J96a	<p>Justi, Marcos Antonio. Automatização do controle de processo de refusão de solda “lead free” em uma linha de produção “SMD”. / Marcos Antonio Justi. Taubaté: Unitau, 2009.</p> <p>62 f.:il;30 cm.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté. Faculdade de Engenharia Mecânica. Curso de Automação Industrial e Robótica.</p> <p>Orientador: José Carlos Lombardi.</p> <p>1. SMD – Surface Mounting Device. 2. Solda sem Chumbo: “Lead Free”. 3. Automação. I. Engenharia Mecânica. II. Título.</p> <p>CDD(21) 658.5</p>
------	---

**AUTOMATIZAÇÃO DO CONTROLE DE PROCESSO DE REFUSÃO DE SOLDA
“LEAD FREE” EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO “SMD”**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre pelo Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação Industrial e Robótica.

Data: 03/fev/2009

Resultado: Aprovado

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos Lombardi Universidade de Taubaté

Assinatura_____

Prof. Dr. Antonio Faria Neto Universidade de Taubaté

Assinatura_____

Prof. Dr. Eugênio Sper de Almeida Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Assinatura_____

Dedico este trabalho a:

Minha esposa Marlene Schor Justi pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Meus filhos, que sempre serão uma fonte de inspiração.

Meus Pais por sempre acreditarem em minha capacidade.

Deus que nos momentos mais difíceis estava onipresente, iluminando meu caminho.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. José Carlos Lombardi, pela humildade com que orientou meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Francisco Carlos P. Bizarria pela dedicação e suporte técnico oferecido, sanando todas as eventuais dúvidas que surgiram no decorrer deste trabalho.

A minha esposa Marlene Schor Justi, pelas opiniões fornecidas na elaboração deste trabalho, sempre coerentes e imparciais.

Aos meus amigos e colegas de trabalho pela significativa contribuição técnica dada durante a elaboração deste projeto.

Resumo

Este trabalho de pesquisa apresenta uma proposta para um sistema de supervisão automatizada de processo dedicado à soldagem de componentes eletrônicos. Essa soldagem é realizada por forno de refusão de solda, o qual pertence ao processo de montagem de produtos eletrônicos com tecnologia de dispositivo de montagem em superfície (*Surface Mounting Devide – SMD*). Esses produtos, para o caso estudado, são aplicados no ramo automotivo, o qual exige que o processo produtivo tenha características destacadas de repetibilidade, padronização, além da preservação do meio ambiente. Para atender essas características o mencionado processo emprega a tecnologia de solda sem chumbo (*lead free*) na soldagem de componentes.

Essa tecnologia exige que o perfil térmico possua uma média de temperatura maior sobre os elementos submetidos ao processo de soldagem, quando comparado com o processo tradicional estanho-chumbo. Para atender essa exigência o sistema de supervisão proposto neste trabalho adquire informações relacionadas a temperaturas das zonas do forno, integridade de resistência de aquecimento, sistema de insuflamento de ar quente e velocidade de operação da esteira transportadora de placas. Essa aquisição é apresentada para o operador do sistema, por meio de uma Interface Homem-Máquina, com a meta de alertar sobre o atual estado do processo. Nessa interface é destacada a previsão de campos relacionados com registro contínuo das informações adquiridas, parametrização de informações de processo, alarmes visuais e sonoros.

A avaliação sistêmica dessa proposta de monitoração de informações indica que se forem controladas todas as características críticas do forno poderá haver contribuição para a melhoria no aludido processo de produção especialmente no que se refere à qualidade da soldagem, bem como a integridade física de todos os componentes do produto.

Palavras-chave: Forno, “Lead free”, Perfil de temperatura e SMD.

Abstract

This research presents a proposal for an automated supervision system of dedicated soldering process of electronic components. This soldering is accomplished by a reflow oven, which belongs to the process of assembly of electronic products with Surface Mounting Device (SMD) technology. These products, for the studied case, are applied in the automotive branch, which demands that the productive process has outstanding characteristics of repeatability, standardization, beyond of the preservation of the environment. To assist those characteristics mentioned, this process uses the solder technology without lead (lead free) in the soldering of components.

This technology demands that the thermal profile possesses an average of bigger temperature on the elements submitted to the soldering process, when compared with the traditional process tin-lead. To assist that demand the supervision system proposed in this work acquires information related with temperature of oven zones, integrity of heating resistance, blower system and speed of board transportation belts / conveyors. This acquisition is presented for system operator by means of Man-machine Interface, with the goal of to sensitize on the current state of the process. In that interface it is detached the forecast of fields related with continuous registration of the acquired information, make the process information on a parameter, visual and sonorous alarms.

The systemic evaluation of this proposal indicates that if controlled all the critical characteristics of the oven it will be able to have contribution for the improvement in the alluded process of production especially in what refers to the quality of the product.

Key-words: Oven, lead free, thermal profile and SMD.

Sumário

Introdução	11
Capítulo 1 – Revisão da literatura	13
Capítulo 2 – Conceitos básicos.....	15
2.1-Processo atual de refusão estanho-chumbo.....	15
2.1.1-Aplicação de solda em pasta.....	16
2.1.2-Colocação de componentes.....	16
2.1.3-Refusão de solda.....	17
2.1.4-Controle atual.....	18
2.2-Novo processo de refusão de solda <i>lead free</i>	20
2.3-Termopar.....	23
2.4-Sensores de corrente por efeito Hall.....	27
2.5-Sensor de velocidade angular (<i>encoder</i>).....	28
2.5.1- <i>Encoder</i> tipo absoluto.. ..	28
2.5.1.1-Codificação binária padrão.....	29
2.5.1.2-Codificação binária tipo <i>gray</i>	31
2.5.2- <i>Encoder</i> tipo relativo.....	31
2.6-Controlador lógico programável (CLP).....	32
2.6.1-Descrição de um CLP.....	33
2.6.1.1-Fonte de alimentação.....	34
2.6.1.2-Módulos de entrada/saída.....	34
2.6.1.3-Processador (UCP).....	35
2.6.2-Programação de um CLP.....	39
Capítulo 3-Proposição.....	40
Capítulo 4-Material e Método.....	43
4.1-Lista de Material.....	43
4.2-Método.....	43
4.2.1-Identificação de produtos comerciais.....	44
4.2.1.1-Sensor de corrente.....	44
4.2.1.2.-Amplificador para termopar.....	45
4.2.2-Interfaces.....	48
4.2.2.1-Interface para resistências elétricas.....	48
4.2.2.2-Interface para insuflador de ar.....	49
4.2.2.3-Interface para <i>encoder</i>	50
4.2.3-Correlação de dados.....	51
4.2.4-Programação do controlador lógico programável (CLP).....	52
4.2.5-Funcionamento integrado do sistema.....	53
Capítulo 5 – Resultados e Discussão.....	55
5.1-Simulação da interface para resistência elétrica e insuflador de ar.....	55
5.2-Experimento interface para <i>encoder</i>	56
5.3-Experimento amplificador para termopar.....	57
5.4-Simulação da programação do CLP.....	58
Capítulo 6-Conclusão.....	61
Referências Bibliográficas.....	62
Anexo A – Amplificador operacional.....	64
A.1-Amplificador operacional ideal.....	64
A.2-Montagens básicas.....	65
A2.1-Montagem inversora.....	65

A2.2-Montagem não inversora.....	66
A2.3-Amplificador somador inversor.....	67
A2.4-Comparador de zero não inversor.....	69
A2.5-Comparador de zero inversor.....	70
A2.6-Comparador inversor com histerese.....	70

Lista de figuras

Figura 1-Processo atual.....	15
Figura 2-Aplicação de solda em pasta.....	16
Figura 3-Colocação de componentes.....	17
Figura 4-Forno de refusão de solda.....	18
Figura 5-Perfil térmico estanho-chumbo.....	19
Figura 6-Efeito <i>tombstone</i>	20
Figura 7-Efeito <i>tombstone</i> (2).....	21
Figura 8-Auto alinhamento processo estanho-chumbo.....	21
Figura 9-Auto alinhamento processo <i>lead free</i>	21
Figura 10-Perfil térmico <i>lead free</i>	22
Figura 11-Circuito simples de um termopar.....	23
Figura 12-Gráfico da relação f.e.m. x temperatura.....	25
Figura 13-Curva característica ideal de um sensor Hall.....	27
Figura 14- <i>Encoder</i> rotativo absoluto.....	28
Figura 15-Arquitetura do CLP.....	33
Figura 16-Diagrama em blocos do funcionamento de um CLP.....	36
Figura 17-Diagrama em blocos da UCP.....	37
Figura 18-Diagrama em blocos simplificado.....	40
Figura 19-Diagrama de conexão do Secohr.....	45
Figura 20-Circuito típico AD595.....	47
Figura 21-Pinagem AD595.....	47
Figura 22-Interface para resistências.....	49
Figura 23-Interface para insufladores.....	50
Figura 24-Interface para <i>encoder</i>	51
Figura 25-Programação do CLP.....	52
Figura 26-Diagrama em bloco do sistema.....	54
Figura 27-Tensão de saída do circuito comparador.....	55
Figura 28-Gráfico frequência X tensão.....	56
Figura 29-Gráfico temperatura X tensão.....	57
Figura 30-Resistência 1 em aberto.....	58
Figura 31-Insuflador 3 com problemas.....	59
Figura 32- <i>Encoder</i> e termopares fora dos limites.....	60
Figura A1-Amplificador operacional ideal.....	64
Figura A2-Curto-circuito virtual.....	64
Figura A3-Montagem inversora.....	66
Figura A4-Montagem não inversora.....	66
Figura A5-Somador inversor.....	67
Figura A6-Resistências de entrada iguais.....	68
Figura A7-Todas as resistências iguais.....	68
Figura A8-Detector de zero não inversor.....	69
Figura A9-Saída de um detector de zero não inversor.....	69
Figura A10-Detector de zero inversor.....	70
Figura A11-Saída de um detector de zero inversor.....	70
Figura A12-Comparador inversor com histerese.....	71
Figura A13-Saída com histerese.....	71

Lista de tabelas

Tabela 1-Código binário padrão.....	29
Tabela 2-Código binário tipo <i>gray</i>	31
Tabela 3-Lista de materiais.....	43
Tabela 4-Tensão de saída x temperatura no termopar.....	46
Tabela 5-Matriz de entradas digitais.....	51
Tabela 6-Matriz de entradas analógicas.....	51
Tabela 7-Limites das entradas analógicas.....	53
Tabela 8-Relação frequência x tensão.....	56
Tabela 9-Relação temperatura x tensão.....	57

Introdução

A RoHS (*Restriction of Hazardous Substances* – restrição de uso de substâncias nocivas) é uma diretiva europeia onde se prevê a restrição do uso de certas substâncias perigosas, dentre elas podemos citar o cromo hexavalente, o cádmio, o mercúrio e o chumbo. Entrou em vigor em 1º de julho de 2006, obrigando as indústrias a adequarem seus produtos e processos para atender a todos seus requisitos, dentre eles está a eliminação do chumbo, ao qual chamamos de produtos e/ou processos *Lead Free* [DIRECTIVE 2002/95/EC]. Na indústria eletroeletrônica o chumbo é encontrado nas ligas de solda que atualmente possuem 63% de estanho e 37% de chumbo [WASSINK, R.J.K. 1989]. No Japão esta nova tecnologia já vem sendo utilizada desde 2004 [MORIYA,J 2006].

Basicamente os processos de soldagem existentes na manufatura de placas eletrônicas são de 4 tipos:

- Soldagem por onda, onde são utilizadas máquinas automáticas de solda compostas basicamente de tanques de solda, bocais de contato e esteiras carregadoras de placas. A placa é transportada até o bocal de solda onde a parte inferior da mesma é imersa na solda derretida soldando os terminais de todos os componentes ao mesmo tempo;
- Soldagem seletiva, também em máquinas automáticas de solda, porém apenas alguns pontos da placa são soldados;
- Soldagem manual, onde a soldagem é feita manualmente utilizando-se ferro ou estações de solda;
- Soldagem por refusão de solda, utilizada nos processos de SMD (*surface mounted device*), onde é aplicada uma solda em pasta e posteriormente a mesma é refundida após passar por um forno de refusão de solda [MORIYA,J 2006].

O objetivo principal deste trabalho é propor um controle automático do processo de refusão de solda, uma vez que com a utilização de solda *Lead Free* há a necessidade de um processo mais estável, menos sujeito às variações, principalmente no que se refere ao perfil de temperatura utilizado. Todas as variáveis do sistema serão monitoradas e comparadas com uma base de dados adquiridos previamente, de forma que toda variação do processo possa ser verificada se está dentro dos limites especificados, garantindo assim a qualidade do produto final.

Capítulo 1 – Revisão da Literatura

As peculiaridades do processo atual de soldagem estanho-chumbo foram pesquisadas no livro *Soldering in electronics* [WASSINK, R.J.K. 1989]. Enquanto que os conceitos referentes à nova tecnologia *Lead free* foram adquiridos do livro *Implementing lead free electronics* [HWANG, JENNIE S. 2005] bem como da apostila de treinamento em *Lead free* da empresa tecsolda [MORIYA, J. 2006] além de artigo do SAE Brasil de [JUSTI, M.A. / LOMBARDI, J.C. / BIZZARRIA, F.C.P 2006].

Os conceitos sobre controlador lógico programável foram obtidos do manual do centro de treinamento SMAR [CORETTI, J.A. 1998], do livro *Programmable logic controllers* [SIMPSON, C.D. 1994], e do livro *Programmable Controllers – Operation and Application* [WARNOCK, I.G. 1997]. Das referências [ENCODER 2006], [TERMOPARES-1 2006], [TERMOPARES-2 2006], [HONEYWELL 2008] e [OLIVEIRA, W.D. / COSTA, R.S. e outros 2005] foram extraídos trabalhos que contribuíram para o desenvolvimento dos conceitos sobre sensores de velocidade angular, termopares e sensores de corrente.

A teoria sobre amplificadores operacionais do anexo A foi verificada em [TOLOMEI, H /XAVIER, C e outros 2004] e os conceitos sobre amplificadores de termopares foram pesquisados em [DATASHEET AD595].

A estrutura deste trabalho está organizado da seguinte forma: neste capítulo contém a revisão bibliográfica dos assuntos abordados neste projeto; o capítulo 2 apresenta o funcionamento de um processo de refusão tanto no processo convencional (estanho-chumbo) como no processo *lead free*, abordando-se também todos os sensores necessários para realização das leituras do processo; no capítulo 3 é apresentada a proposição do trabalho; no capítulo 4 discute-se o método para se chegar aos resultados; no capítulo 5 expõe-se os experimentos e simulações realizadas; no capítulo 6 discute-se as conclusões obtidas e

apresenta-se as perspectivas de continuidade deste trabalho. No anexo A encontra-se a teoria necessária referente aos amplificadores operacionais utilizados em alguns dos circuitos propostos.

Capítulo 2 – Conceitos Básicos

Neste capítulo será verificado o processo atual de soldagem por refusão de solda estanho-chumbo, bem como o novo processo para a refusão de solda *lead free*. Também será objeto de estudo os seguintes sensores: termopar, sensor de corrente, encoder, bem como o princípio de funcionamento de controlador lógico programável.

2.1 PROCESSO ATUAL DE REFUSÃO ESTANHO-CHUMBO

A figura 1 mostra quais são as fases do processo atual de refusão estanho-chumbo.

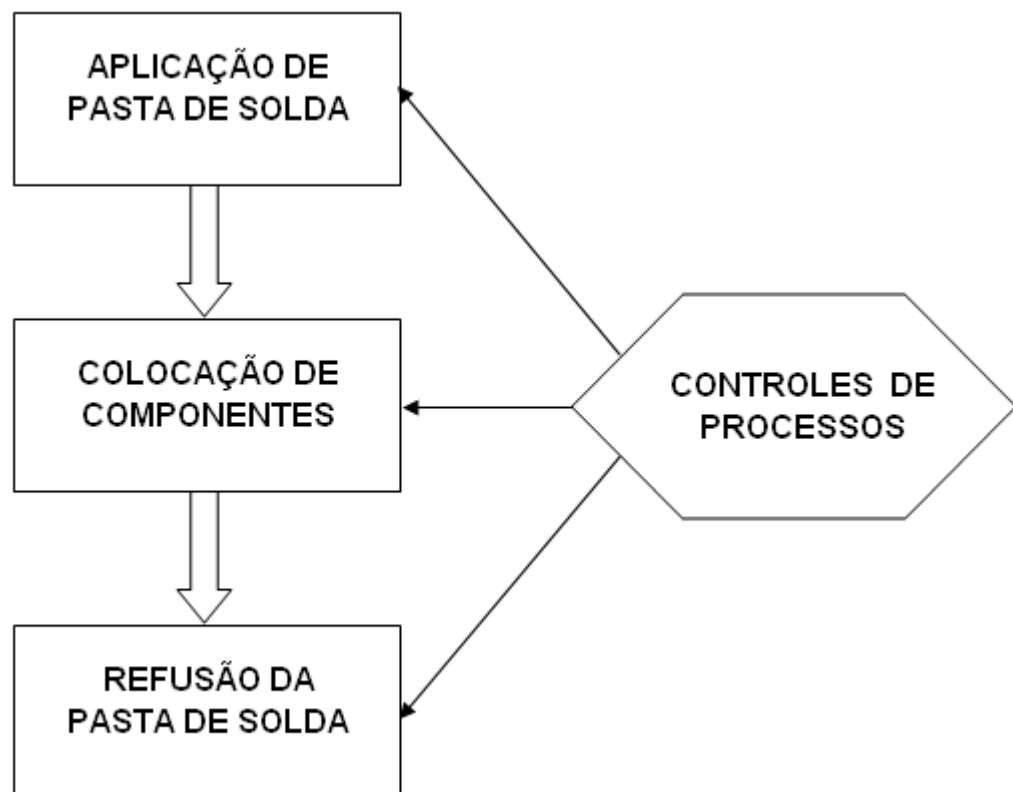


Figura 1 – Processo atual

2.1.1. Aplicação de solda em pasta

Este processo é muito similar ao processo de *silk-screen*, onde se utiliza uma máscara metálica (chamada de *Stencil*) e a aplicação é realizada manualmente ou automaticamente (*screen printer*), espalhando-se, no caso, a solda em pasta sobre a máscara e a mesma é depositada sobre a placa de circuito impresso. Na figura 2 tem-se um exemplo de aplicação de solda em pasta [JUSTI 2006].

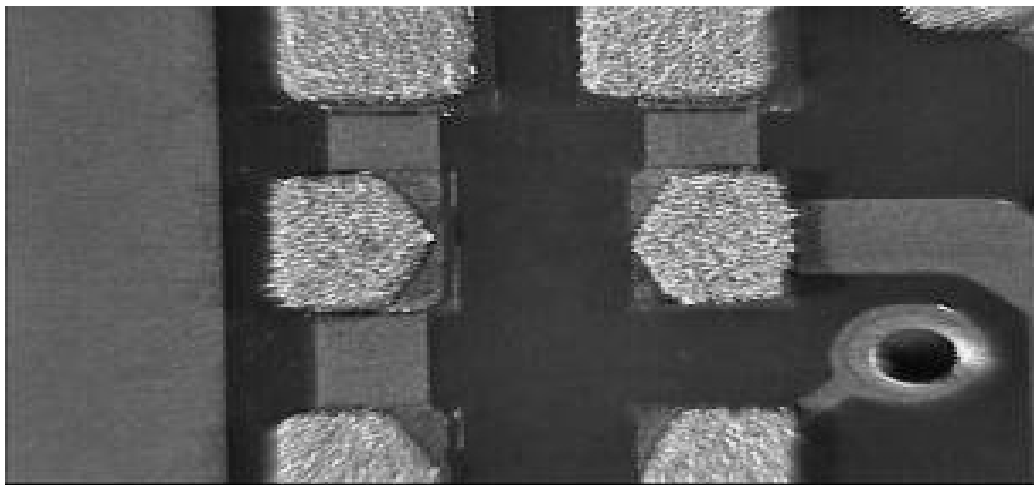


Figura 2 – Aplicação de solda em pasta [JUSTI 2006]

2.1.2. Colocação de componentes

A colocação de componentes SMD é realizada por máquinas automáticas (figura 3). Normalmente se utiliza dois tipos diferentes, um para colocação de componentes menores (resistores, capacitores, etc.) e outro para colocação dos componentes maiores (circuitos integrados, conectores, etc.) [JUSTI 2006].

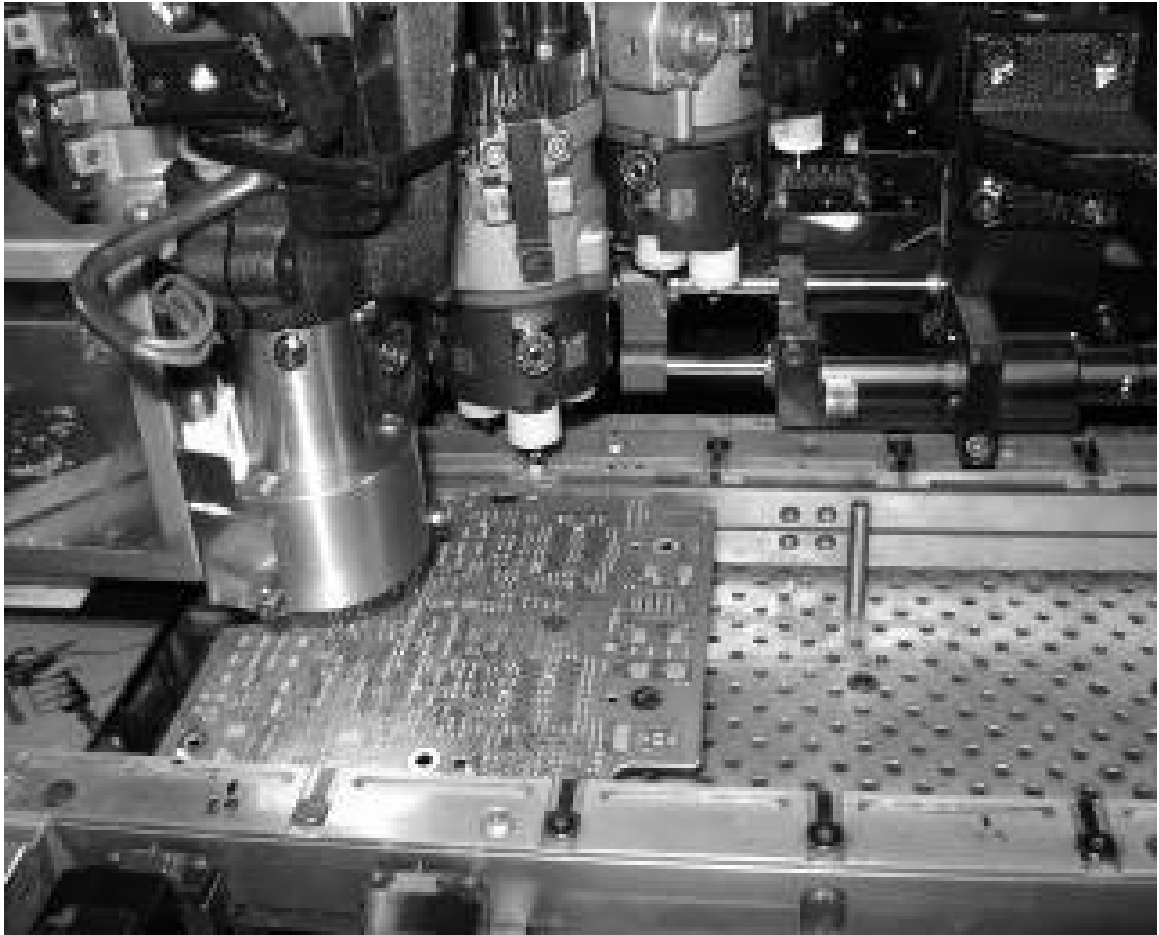


Figura 3 – Colocação de componentes [JUSTI 2006]

2.1.3. Refusão de solda

A refusão de solda é realizada em um forno industrial (figura 4) composto por várias zonas de aquecimento, que permitem o ajuste do perfil térmico desejado para o produto em produção. No processo estanho-chumbo o pico de temperatura está em torno de 225° C [WASSINK 1989].



Figura 4 – Forno de refusão de solda [JUSTI 2006]

2.1.4. Controle Atual

Além das manutenções preventivas e preditivas realizadas no equipamento, na fase de aplicação de solda em pasta, têm-se basicamente dois tipos de controle de processo:

- Volume de solda aplicada nos *pads* (ilhas de contato) da placa de circuito impresso;
- Centralização da solda.

Com relação à colocação de componentes, o principal controle está na centralização do componente, que está relacionada ao sistema de coordenadas X-Y-Z do equipamento. O processo de refusão de solda não se baseia exclusivamente na temperatura aplicada nas zonas do forno industrial, pois existem outros fatores que são igualmente importantes para que se

tenha o perfil térmico adequado ao produto, entre eles pode-se citar, velocidade da esteira transportadora de placas de circuito impresso, a integridade das resistências elétricas, além das condições dos insufladores de ar [JUSTI 2006].

Atualmente para obter o perfil térmico, utiliza-se um equipamento coletor de dados, que é composto por uma placa com memória acoplada a vários sensores térmicos (termopar), que registra a temperatura ao longo do tempo. Estas informações são posteriormente descarregadas em um micro computador. A figura 5 é um exemplo de gráfico gerado a partir de dados coletados em um forno de refusão de solda [JUSTI 2006].

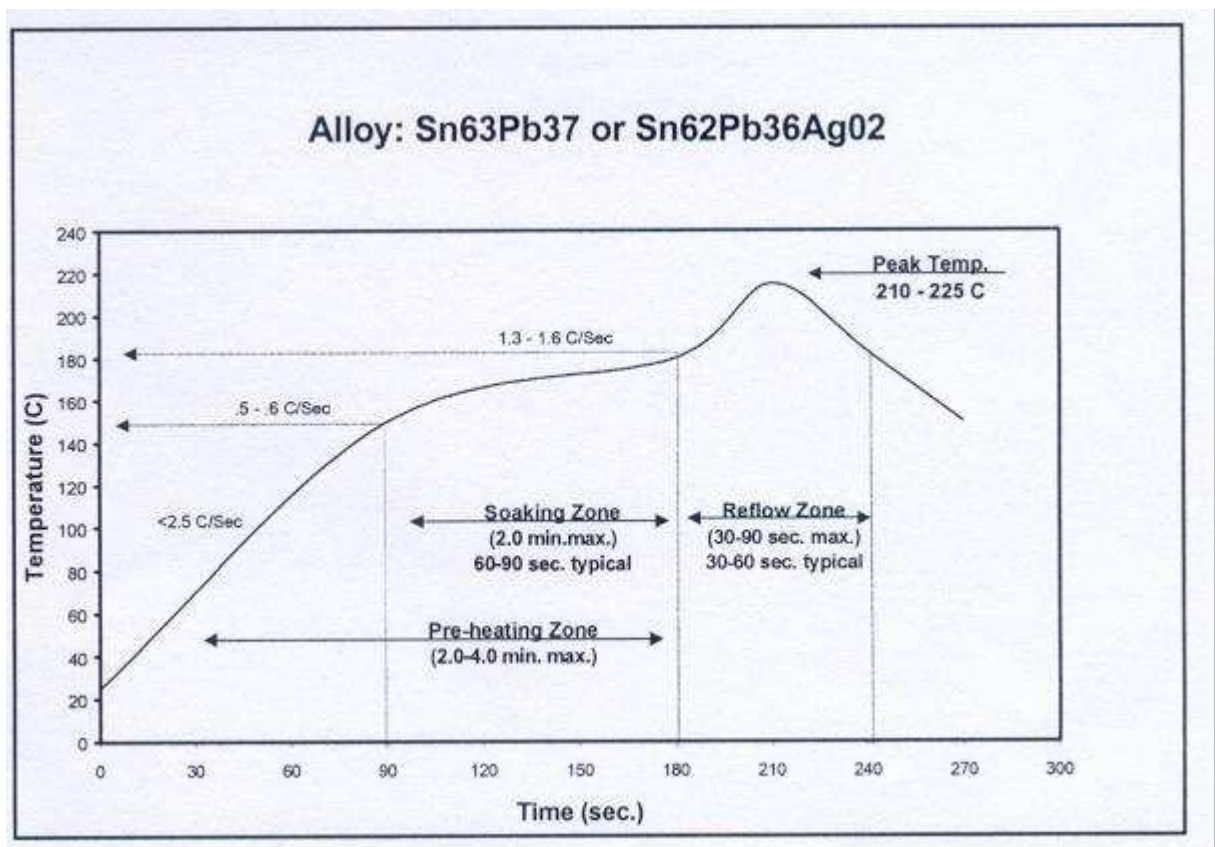


Figura 5 – Perfil térmico estanho-chumbo [KESTER 2006]

O problema com este tipo de controle é que ele é baseado na experiência e/ou tempo disponível do responsável pelo processo de manufatura, sendo que o espaço de tempo entre uma verificação e outra pode variar desde algumas horas, dias, semanas ou até meses. Caso algum problema ocorra entre uma verificação e outra, existe a probabilidade de que todos os produtos manufaturados neste período de tempo tenham algum problema de qualidade que só

será observado no cliente final, gerando o desgaste da imagem da empresa. Mesmo que seja detectado durante a inspeção no final da linha de produção, também já é tarde, pois gerará reparos e possíveis refugos, aumentando o custo de produção [JUSTI 2006].

2.2 NOVO PROCESSO DE REFUSÃO DE SOLDA *LEAD FREE*

Assim como no processo estanho-chumbo, no *lead free* existem as mesmas três etapas de manufatura. Com relação às duas primeiras etapas a principal característica técnica que deve ser observada diz respeito à precisão, tanto da aplicação da solda, como da colocação de componentes. Pois na solda *lead free* não ocorre o efeito conhecido como “auto alinhamento” ou “auto ajuste” durante a refusão da solda, de forma que quando a pasta ou os componentes ficam mal posicionados pode se ter o efeito chamado *tombstone* mostrado nas figura 6 e figura 7 [MORIYA 2006].

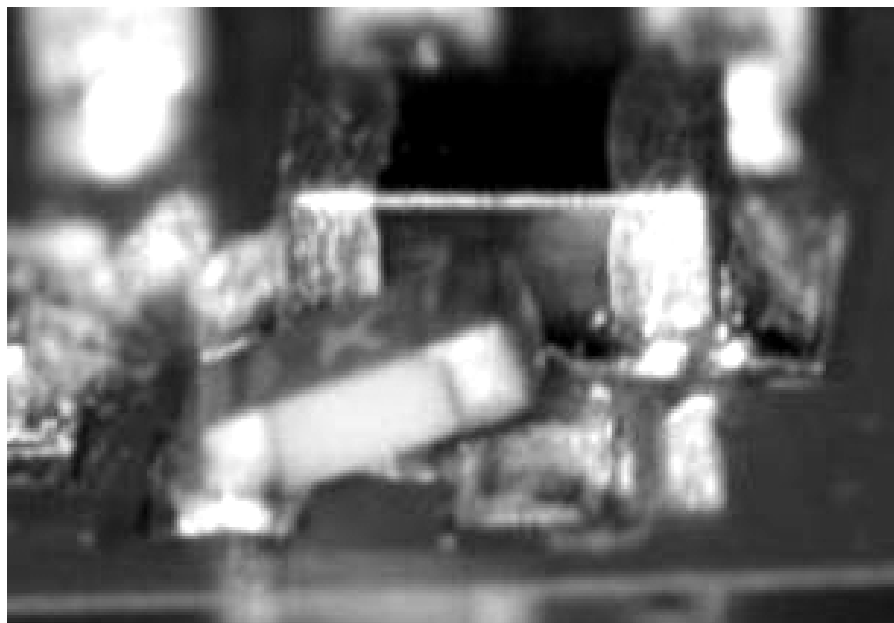


Figura 6 – Efeito *tombstone* [MORIYA 2006]

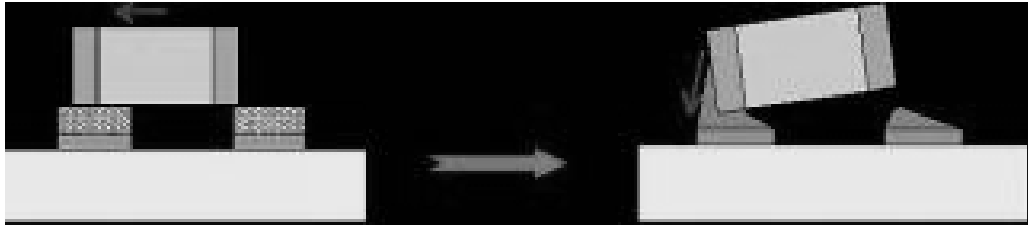


Figura 7 – Efeito *tombstone* (2) [MORIYA 2006]

Pode-se verificar nos gráficos comparativos (figura 8 e figura 9) que no processo estanho-chumbo o efeito de auto alinhamento está potencializado, enquanto que no processo *lead free* este efeito ocorre de forma mais dispersa. Estes gráficos representam a precisão de colocação dos componentes (quanto mais próximo do zero, mais preciso foi a colocação do componente) e a posição final do componente após a soldagem (da mesma forma, quanto mais próximo do zero, mais preciso foi a posição final do componente) [MORIYA 2006].

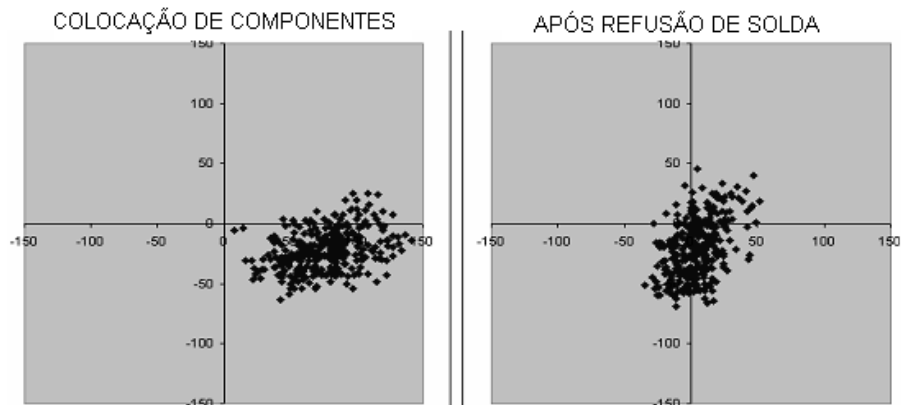


Figura 8 - Auto alinhamento processo Estanho-Chumbo [MORIYA 2006]

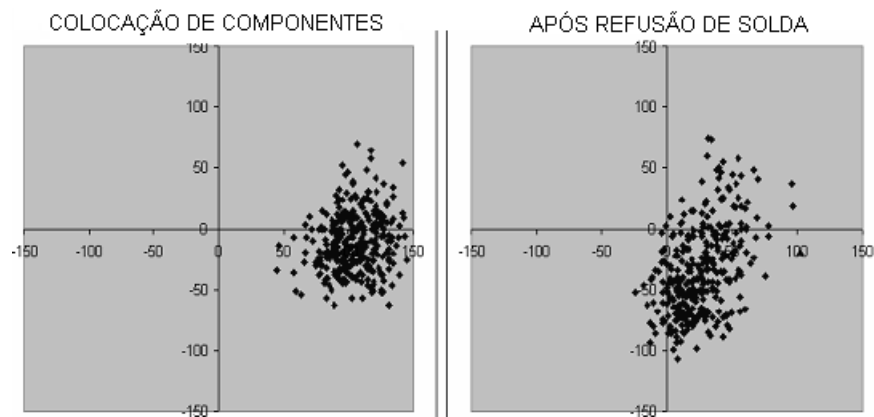


Figura 9 – Auto alinhamento processo *LeadFree* [MORIYA 2006]

Na terceira etapa do processo, a refusão de solda, a principal característica que é alterada é o perfil térmico, que passou a ser mais agressivo, chegando a ter picos de temperaturas variando entre 235 e 255° C (figura 10), o que tornou esta etapa do processo muito delicada devido à sensibilidade dos componentes eletrônicos quanto à elevação da temperatura [HWANG 2005].

Até 245° C tem-se uma faixa segura para todos os tipos de componentes. De 245 a 250° C tem-se uma faixa crítica para os componentes ativos (circuitos integrados, etc.). De 250 a 260° C é uma faixa crítica para os componentes passivos (resistores, capacitores, etc.). O que torna a janela de processo extremamente estreita exigindo que haja um controle de processo constante e rigoroso [MORIYA 2006].

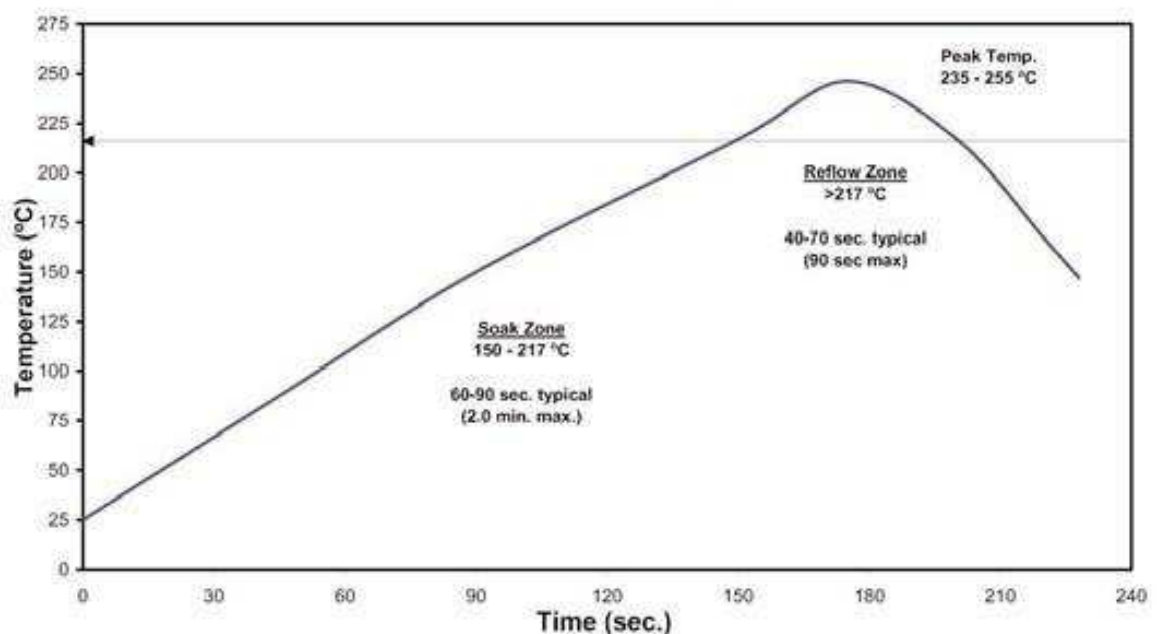


Figura 10 – Perfil térmico *Lead Free* [KESTER 2006]

2.3 TERMOPAR

Os termopares são sensores para medição de temperatura de maior uso industrial. Cobrem uma faixa bastante extensa de temperaturas que vai de -200 a 2300 °C aproximadamente e possui baixo custo se comparado com outros tipos de sensores. A medição de temperatura por termopares data de 1821, quando T. J. Seebeck descobriu que uma corrente elétrica é gerada em um circuito contínuo formado por dois fios metálicos de materiais distintos quando as duas soldas (juntas) estão em temperaturas diferentes. Os termopares são sensores de temperatura baseados no princípio de que, enquanto dois metais diferentes forem unidos, uma tensão pré-estabelecida será gerada, relacionando a diferença de temperatura entre a junção de medição e a junção de referência [TERMOPARES-1 2006].

Quando as junções de dois metais diferentes formando um circuito fechado são expostas a diferentes temperaturas, uma força eletromotriz (f.e.m.) é gerada, induzindo uma corrente elétrica contínua (efeito Seebeck). Quando este circuito é interrompido, a tensão do circuito aberto torna-se uma função das temperaturas das junções e da composição dos dois metais, chamado assim de tensão Seebeck. O termopar pode ser representado graficamente conforme figura 11. Os dois metais são A e B, e T_1 e T_2 são as temperaturas das junções. Quando T_1 é a temperatura da junta fria (junção de referência) e T_2 é a temperatura da junta quente (junção de medição) a corrente termoelétrica i flui na direção indicada na figura 11 [TERMOPARES-1 2006].

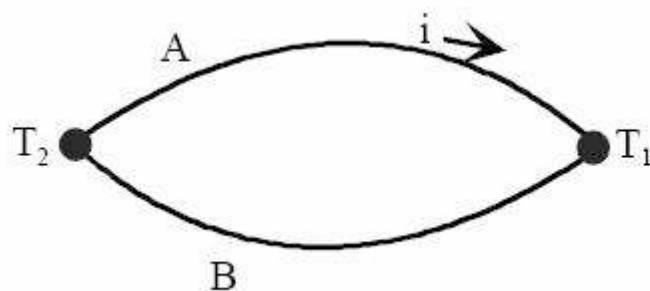


Figura 11 – Circuito simples de um termopar [TERMOPARES-1 2006]

A medida de temperatura por meios termoelétricos é baseada inteiramente na aplicação das leis termoelétricas:

- Lei do circuito homogêneo: dois materiais diferentes são necessários para formar um termopar;
- Lei dos metais intermediários: a f.e.m. gerada por um par termoelétrico não será alterada se for introduzido em qualquer ponto do circuito, um metal genérico diferente dos que compõem o sensor, desde que as novas junções formadas sejam mantidas na mesma temperatura;
- Lei das temperaturas intermediárias: um termopar pode ser usado em qualquer temperatura de referência [TERMOPARES-1 2006].

Para se usar o termopar é necessário conhecer a f.e.m. gerada e a temperatura de referência T_1 , assim tem-se a temperatura T_2 da junção de medição. Uma forma de se determinar a temperatura de referência é colocar a extremidade da junção fria numa mistura de água e gelo a $0\text{ }^\circ\text{C}$ e a tensão gerada será de zero mV, assim o sinal gerado pelo sensor só dependerá da temperatura da junção quente do meio a ser medido. Há outras maneiras, como dispositivos alternativos (resistor, termistor, etc), que simulam automaticamente a temperatura da referência. Os termopares geram a f.e.m. na faixa de mV, então, é necessário converter estes dados em temperaturas. A relação f.e.m. x temperatura de um termopar não é linear. O instrumento indicador deve de algum modo converter o sinal gerado pelo sensor. Várias tabelas dão as relações f.e.m. x temperatura para os tipos mais comuns de termopares usados na indústria. Alternativamente, um polinômio pode ser aproximado descrevendo a curva do sensor, cujos coeficientes são determinados para intervalos de temperatura apropriados. A figura 12 mostra um gráfico de relação f.e.m. x temperatura para os vários tipos de termopares existentes [TERMOPARES-1 2006].

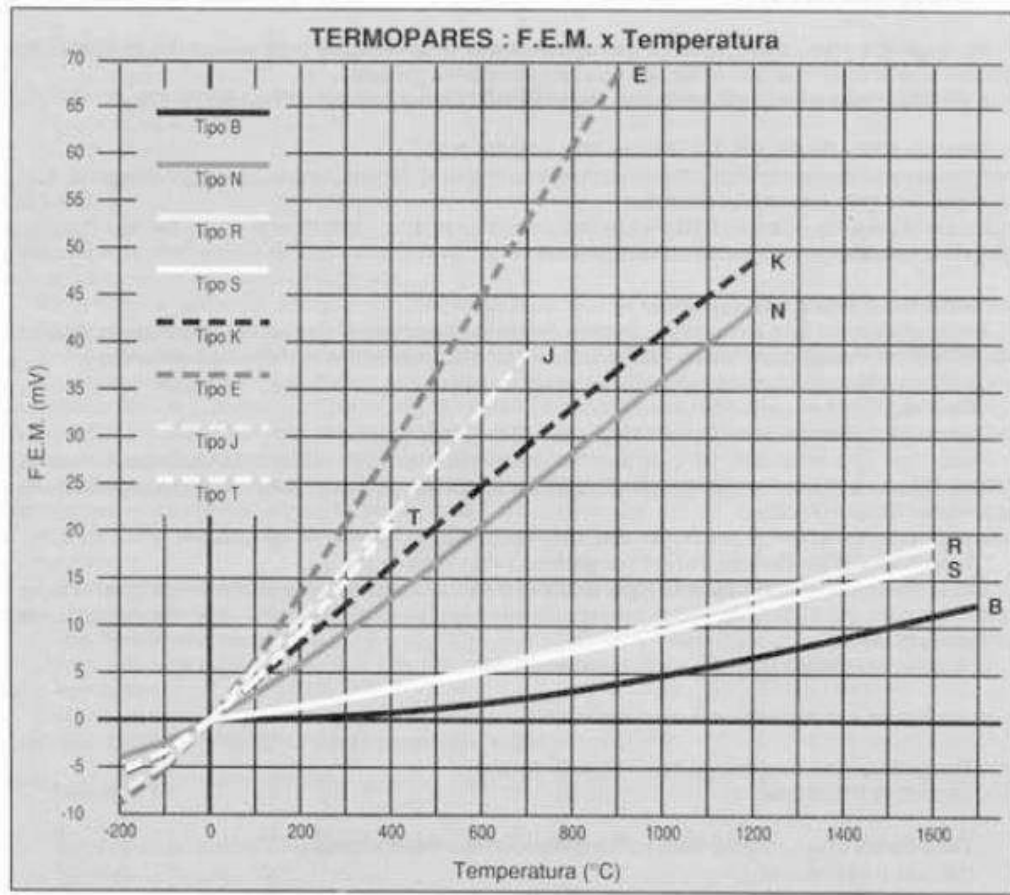


Figura 12- Gráfico da relação f.e.m. x temperatura [TERMOPARES-1 2006]

Alguns erros na medida devem-se a termopares descalibrados, provocando desvios de centésimos ou até décimos de graus. A calibração é feita comparando a temperatura indicada pelo termopar a indicada por um termômetro, ambos no mesmo meio, de forma que as temperaturas possam ser comparadas [TERMOPARES-1 2006].

A seleção do melhor tipo de termopar é baseada na temperatura de aplicação, características ambientais, comprimento exigido para a execução do serviço, precisão e custo. A seguir os tipos de termopares mais comuns, a faixa de temperatura de trabalho e suas características de utilização [TERMOPARES-2 2006].

- **Tipo K** [Níquel-Cromo(+) Níquel-Alumínio(-)]. O termopar tipo K é um termopar de uso genérico. Tem baixo custo e cobre temperaturas entre -200 e 1200 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

- Tipo E [Níquel-Cromo(+) Cobre-Níquel(-)]. Este termopar tem uma elevada sensibilidade ($68 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$) que o torna adequado para temperaturas abaixo de zero grau.
- Tipo J [Ferro(+) Cobre-Níquel(-)]. Sua faixa de temperatura está entre -40 e 750°C . Não se recomenda o seu uso para temperaturas abaixo de zero grau. A utilização do termopar tipo J acima dos 760°C leva a perda da calibração.
- Tipo N [Platina-Cromo-Silício(+) Níquel-Silício(-)]. A sua elevada estabilidade e resistência à oxidação em altas temperaturas tornam o tipo N adequado para medições de temperaturas elevadas, sem recorrer aos termopares que incorporam platina na sua constituição (tipos B, R e S). Foi projetado para ser uma “evolução” do tipo K.

Obs: os termopares tipo B, R e S apresentam características semelhantes. São dos termopares mais estáveis, contudo, devido à sua reduzida sensibilidade (da ordem dos $10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$), utilizam-se apenas para medir temperaturas acima dos 300°C . Note-se que devido à reduzida sensibilidade destes termopares, a sua resolução de medida é também reduzida.

- Tipo B [Platina-30%Ródio(+) Platina-6%Ródio(-)]. Adequado para medição de temperaturas entre 600 e 1700°C .
- Tipo R [Platina-13%Ródio(+) Platina(-)]. Adequado para medição de temperaturas de zero a 1600°C . Custo elevado.
- Tipo S [Platina-10%Ródio(+) Platina(-)]. Adequado para medição de temperaturas de zero a 1600°C . Custo elevado.
- Tipo T [Cobre(+) Cobre-Níquel(-)]. Apresenta boa precisão na faixa de -200 a 350°C [TERMOPARES-2 2006].

Os termopares são transdutores robustos de medida e podem ser usados em condições severas de medida. Os sinais medidos são de nível baixo e por isso suscetíveis a ruídos. Portanto é aconselhável que sejam blindados para que se tenha um bom desempenho [TERMOPARES-2 2006].

2.4 SENSORES DE CORRENTE POR EFEITO HALL

Quando se aplica um campo magnético em um condutor, as cargas elétricas se distribuem de modo que as cargas positivas ficam de um lado e as cargas negativas do lado oposto da borda do condutor, de modo que surge nas bordas do material a chamada tensão Hall. Este é o efeito Hall [OLIVEIRA 2005].

Um sensor de corrente normalmente tem como princípio fundamental a aquisição do fluxo magnético produzido pela corrente que circula pelo condutor onde se deseja realizar a medida de corrente elétrica e utilizando um sensor Hall pode-se capturar uma tensão Hall proporcional ao fluxo magnético e conseqüentemente à corrente elétrica [OLIVEIRA 2005].

Na figura 13, tem-se um exemplo de uma curva característica ideal de um sensor Hall, a tensão de saída será metade da tensão de alimentação (V_{cc}) quando a corrente no condutor a ser medida for zero. A tensão de saída irá variar de 25% a 75% da tensão de alimentação, quando a corrente é positiva a tensão de saída irá variar de metade do V_{cc} até $0,75V_{cc}$ e quando for negativa variará de metade do V_{cc} até $0,25V_{cc}$ [HONEYWELL 2008].

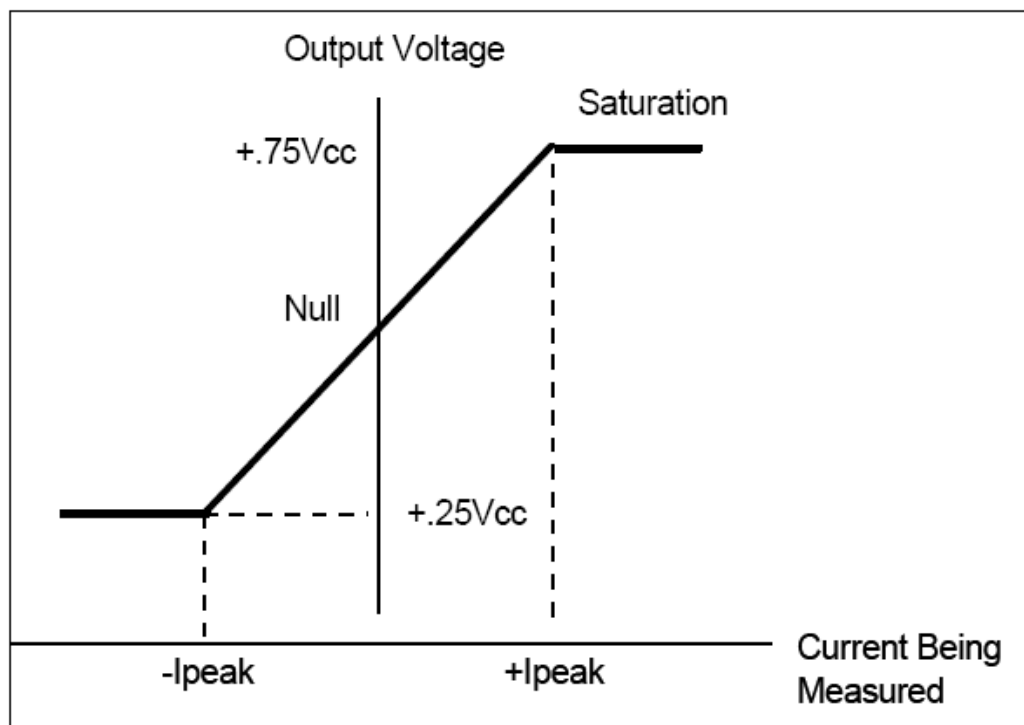


Figura 13 – Curva característica ideal de um sensor Hall [HONEYWELL 2008]

Para se reduzir a influência de ruídos indesejáveis, se utiliza o sensor Hall trabalhando na parte superior da curva característica, próximo a área de saturação. Como os sensores de correntes são baseados nos sensores de efeito Hall, os mesmos estão sujeitos a pequenas variações devido a variação de temperatura. Pode-se tomar como valor típico a seguinte sensibilidade: $\pm 0,03\% / ^\circ\text{C}$. Outro valor típico para os sensores de corrente por efeito Hall é o seu tempo de resposta que fica em torno de 3 micro segundos [HONEYWELL 2008].

2.5 SENSOR DE VELOCIDADE (*ENCODER*)

Um *encoder* rotativo é um dispositivo eletromecânico usado para converter uma posição angular de um eixo em um código digital. São utilizados em robótica, equipamentos de informática, etc. Existem dois tipos principais: absoluto e o relativo [ENCODER 2006].

2.5.1 *Encoder* tipo Absoluto



Figura 14 – *Encoder* rotativo absoluto [ENCODER 2006]

O encoder tipo absoluto (figura 14) é aquele que produz um código digital único para cada ângulo do eixo. A construção é realizada fixando-se uma chapa de metal cortada em um padrão complexo, a um disco isolante que por sua vez é anexado ao eixo rotativo. Uma linha

de contatos é colocada transversalmente ao disco de modo que haja contato elétrico onde exista o metal do disco. A chapa de metal é conectada a uma fonte de corrente e cada contato a um sensor elétrico de forma que para cada posição do eixo tem-se um código binário único, pois para algumas posições teremos uns contatos ligados e outros desligados. Este código gerado pode ser lido por um controlador, como um microprocessador, para determinação do ângulo do eixo do *encoder* [ENCODER 2006].

2.5.1.1 Codificação Binária Padrão

Um exemplo de codificação binária, em um *encoder* extremamente simples com apenas três contatos pode ser vista abaixo:

Tabela 1 – Código binário padrão [ENCODER 2006]

SETOR	CONTATO1	CONTATO2	CONTATO3	ANGULO
1	OFF	OFF	OFF	0° a 45°
2	OFF	OFF	ON	45° a 90°
3	OFF	ON	OFF	90° a 135°
4	OFF	ON	ON	135° a 180°
5	ON	OFF	OFF	180° a 225°
6	ON	OFF	ON	225° a 270°
7	ON	ON	OFF	270° a 315°
8	ON	ON	ON	315° to 360°

ON – Contato ligado

OFF – Contato Desligado

Em geral quando há “**n**” contatos, o numero de posições distintas no eixo será de 2^n . No exemplo anterior “**n**” é igual a 3, portanto temos 8 posições possíveis no eixo [ENCODER 2006].

No exemplo acima, quando o disco gira os contatos produzem um código binário padrão (tabela 1). Porém há a desvantagem de que se o disco parar entre dois setores adjacentes, ou se os contatos não estiverem perfeitamente alinhados, pode ser impossível determinar o ângulo do eixo no exato momento em que acontece a troca de posição. Por exemplo: considerar que haja uma mudança do setor 4 para o setor 5, verificando a tabela 1, o padrão de contatos irá mudar de *off-on-on* para *on-off-off*. Entretanto fisicamente é muito difícil isto acontecer, pois na prática os contatos nunca estão perfeitamente alinhados, de modo que cada contato irá trocar de posição em um momento diferente de tempo. Se o contato 1 trocasse de posição primeiro seguido do contato 3 e posteriormente do contato 2 a seqüência de códigos seria:

off-on-on – posição inicial

on-on-on – contato 1 ligado

on-on-off – contato 3 desligado

on-off-off – contato 2 desligado / posição final [ENCODER 2006]

Se notarmos na tabela 1 esta seqüência representa a mudança do setor 4 para o setor 8, retornando para o setor 7 e finalmente chegando ao setor 5. Este comportamento normalmente não é tolerado ou admitido, pois pode causar falhas graves no sistema onde esta sendo aplicado, por exemplo, se estiver monitorando o braço de um robô o mesmo pode ser levado a uma colisão, vindo a danificar o sistema mecânico. A fim de resolver o problema deve-se utilizar a codificação binária tipo *gray* [ENCODER 2006].

2.5.1.2 Codificação Binária Tipo *Gray*

A codificação binária tipo *gray* é aquela caracterizada pela mudança de apenas um bit de cada vez, ou seja, os códigos adjacentes terão variação de um bit por vez. Para o exemplo de 3 contatos utilizando-se o código *gray* teremos:

Tabela 2 – Código binário tipo *gray* [ENCODER 2006]

SETOR	CONTATO1	CONTATO2	CONTATO3	ANGULO
1	OFF	OFF	OFF	0° a 45°
2	OFF	OFF	ON	45° a 90°
3	OFF	ON	ON	90° a 135°
4	OFF	ON	OFF	135° a 180°
5	ON	ON	OFF	180° a 225°
6	ON	ON	ON	225° a 270°
7	ON	OFF	ON	270° a 315°
8	ON	OFF	OFF	315° to 360°

ON – Contato ligado OFF – Contato Desligado

Analisando a tabela 2, nota-se que em todas as transições de um setor a outro há apenas uma mudança nos estados dos contatos, de forma que a seqüência de códigos incorretos gerados na codificação binária padrão não pode acontecer quando se utiliza a codificação binária tipo *gray* [ENCODER 2006].

2.5.2 *Encoder* tipo Relativo

O *encoder* tipo relativo (também chamado de *encoder* incremental) é usado quando o do tipo absoluto não pode ser utilizado, normalmente devido ao tamanho do seu disco. Neste novo método também há a necessidade de se usar um disco, porém seu tamanho é muito reduzido e o mesmo é marcado por um grande número de linhas radiais, que ao passarem por

um sensor ótico (fotodiodo, etc.) gera um pulso elétrico que será contado por um circuito eletrônico para se poder determinar o ângulo do eixo do *encoder*. Este sistema em sua forma mais simples não pode medir o ângulo absoluto do eixo, mas se existe a necessidade de se conhecer o valor absoluto, então se deve adicionar um segundo sensor para identificar a posição de zero do eixo [ENCODER 2006].

2.6 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP)

Os CLPs são controladores microprocessados especiais que tem funções programadas pelo usuário e substituem os relés utilizados anteriormente. Foram inicialmente projetados para essa função e aplicados em 1969 à linha de produção de uma unidade da General Motors nos EUA como seqüenciadores de estado da máquina. Durante a década de 70, adquiriram instruções de temporização, contadores, operações aritméticas, controle de impressão, movimentação de dados, operações matriciais, terminais de programação TRC (tubos de raio catódico) e controlador lógico PID (proporcional integrativo derivativo) [SIMPSON 1994].

Os CLPs foram inicialmente concebidos por um grupo de engenheiros, sob a liderança do engenheiro Richard Morley, da divisão de hidráulica da General Motors em 1968 levando-se em conta os seguintes critérios [SIMPSON 1994]:

- A máquina deve ser facilmente programada;
- Deve ser de fácil manutenção e reparação em módulos conectáveis;
- Deve ter maior confiabilidade do que um painel de controle de relés;
- Deve ser fisicamente menor do que um painel de controle de relés;
- A unidade deve ser capaz de produzir dados para um sistema central de coleta de dados;
- A unidade deve ter custo competitivo face aos relés e painéis de estado sólido.

2.6.1 Descrição de um CLP

Os componentes básicos de um CLP são três: fonte de alimentação, processador e dispositivo de entrada e saída. A esses três componentes básicos podem ser acrescentados periféricos como monitores, displays LCD, teclado para programação, impressoras, módulos de comunicação, conversores A/D (analógico/digital) e D/A (digital/analógico), etc. Dependendo do tamanho e do fabricante, os componentes básicos podem vir num único encapsulamento ou em módulos separados, que podem estar juntos num mesmo rack ou separados. Geralmente, os módulos do processador e fonte são montados em um local de controle central, enquanto que os módulos de entrada/saída estão localizados na área do processo em que devem atuar. Os módulos se comunicam entre si através de uma rede de comunicação. A arquitetura do CLP está representada na figura 15 [CORETTI 1998].

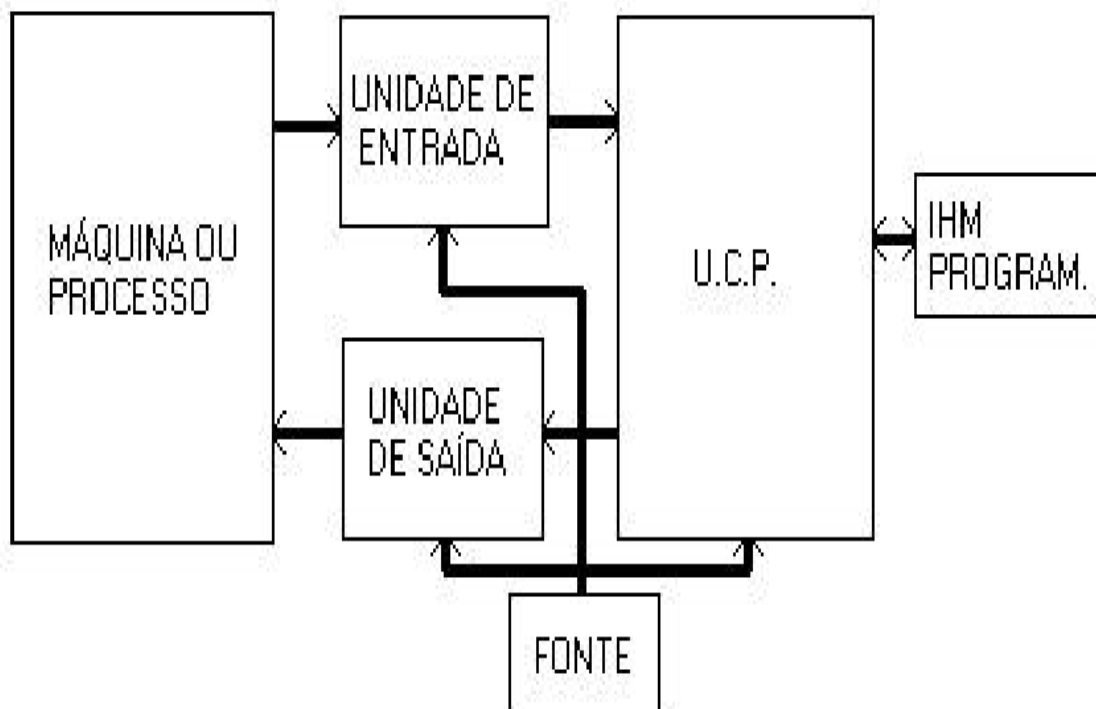


Figura 15 – Arquitetura do CLP [CORETTI 1998]

2.6.1.1 – Fonte de alimentação

A fonte de alimentação converte 120/240 Vca normalmente para 5 ou 12 Vcc, e deve ser escolhida com potência máxima conforme o número de entradas e saídas utilizadas [CORETTI 1998].

2.6.1.2 – Módulos de entrada/saída

As entradas são provenientes de sensores, e os módulos utilizados são muitas vezes específicos para determinado tipo de sensor. Alguns CLPs possuem módulos com botões que simulam entradas. Os módulos de E/S podem ser remotos e são aplicados em situações que apresentam grande número de dispositivos a serem controlados por uma única UCP (unidade central de processamento). As unidades de entrada digital detectam e convertem sinais de comutação de entrada em níveis lógicos de tensão contínua usado no CLP, e geralmente os 24 Vcc do sensor são convertidos em 5 Vcc para uso da UCP. Os transdutores para entrada digital são [CORETTI 1998] :

- Botões;
- Chaves de fim de curso;
- Sensores de proximidade;
- Sensores infravermelhos;
- Sensores de ultra-som;
- Termostatos;
- Push-buttons, etc.

As unidades de entrada analógicas convertem sinais de 0 a 10 Vca ou de 4 a 20 mA em valores numéricos que podem ser utilizados pelo CLP. Exemplos de transdutores analógicos são todos os tipos de transdutores que necessitam fazer conversão de curso, peso, pressão, etc. As saídas podem ser analógicas ou digitais, e podem ter luzes indicativas de estado. São do

tipo CA ou CC, NPN ou PNP (saída a transistor) e se caracterizam pelo nível de tensão e corrente. As saídas são geralmente isoladas do processamento através de acopladores óticos.

Atuadores para saída digital são [CORETTI 1998]:

- Contatores;
- Solenóides;
- Relés;
- Lâmpadas;
- Indicadores; etc.

Atuadores para saída analógica convertem valores numéricos de pressão, velocidade, etc., em sinal elétrico variável. Os atuadores são [CORETTI 1998]:

- Motores;
- Conversor de frequência;
- Válvula proporcional, etc.

2.6.1.3 – Processador (UCP)

O módulo do processador é onde ficam o microprocessador, as memórias e os registradores que executam as operações lógicas do programa do usuário. O tempo de execução, ciclo de varredura ou *scan time* é contado entre a leitura das entradas, o processamento do programa do usuário e o acionamento das saídas, e formam um laço fechado no diagrama em blocos de funcionamento de um CLP. O funcionamento do CLP desde quando é ligado envolve também condições de inicialização tais como [CORETTI 1998]:

1. Limpeza das memórias imagens de entradas e saídas;
2. Teste de escrita e leitura da memória;
3. Teste de executabilidade do programa de usuário;

4. Execução de rotinas de inicialização, limpeza de registros auxiliares, limpeza do display e preparação do teclado se existir interface homem máquina (IHM);

Após estes testes a UCP executa em laço fechado do programa do usuário ininterruptamente até encontrar uma interrupção de software ou hardware. A figura 16 representa em diagrama de blocos o funcionamento do CLP com o ciclo de execução em laço [CORETTI 1998].

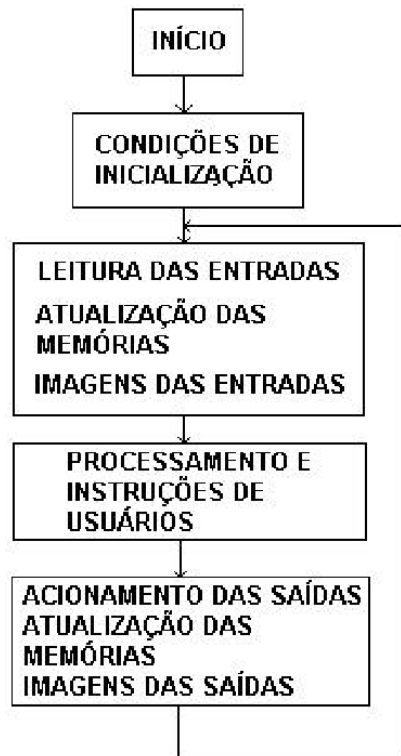


Figura 16 - Diagrama em blocos do funcionamento de um CLP [CORETTI 1998]

A UCP é o centro do CLP e é composta pelo microprocessador, memórias, interface de programação, IHM e o sistema *watchdog timer*, conforme visto na figura 17 [CORETTI 1998].

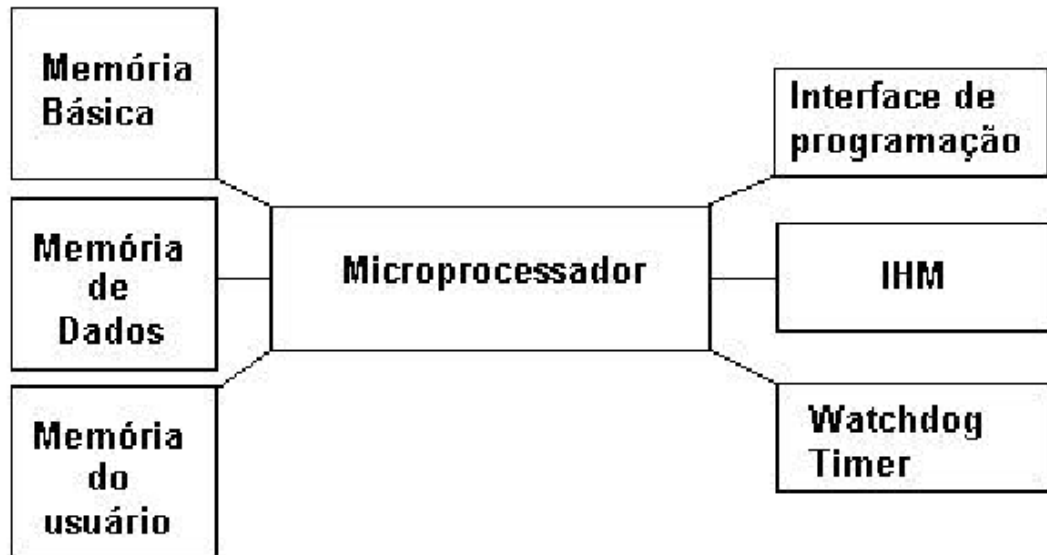


Figura 17 – Diagrama em blocos da UCP [CORETTI 1998]

Microprocessador: o módulo de processamento monitora os sinais de entrada do controlador programável e os combina de acordo com as instruções de usuário, executando operações lógicas, seqüências, etc. para em seguida enviar os sinais apropriados às saídas. [CORETTI 1998]

Memórias: a arquitetura de memória de um CLP pode ser constituída por memórias RAM, ROM, PROM, EPROM. [CORETTI 1998]

A **memória básica** controla todas as funções do CLP. Nela são armazenados o sistema operacional, os comandos de programação do usuário, etc. Geralmente é uma memória do tipo ROM, PROM ou EPROM e têm as características [CORETTI 1998]:

- Acessar as memória do tipo RAM alterando seu conteúdo. As memórias RAM tem a função de armazenar resultados ou informações intermediárias geradas pelo sistema operacional quando necessário.

- Armazenar o estado dos módulos de E/S: a UCP, após ter efetuado a leitura dos estados de todas as entradas, armazenará essas informações na área denominada estado das entradas. Após o processamento dessas informações, os resultados lógicos serão armazenados na área denominada estado das saídas antes de serem enviadas para a saída física.

A **memória de dados** armazena todos os dados, as informações e estados das entradas e saídas, os estados auxiliares e os resultados de operações lógicas e aritméticas. A **memória do usuário** armazena o programa de usuário que o CLP vai executar quando energizado [CORETTI 1998].

Interface de programação: permite a programação do CLP. Em alguns CLPs esta programação é feita através de terminais de programação ou na própria IHM. Atualmente a maioria dos CLPs são programados através de microcomputadores por software específicos para desenvolvimento de programas do usuário com simbologia gráfica. A IHM permite a visualização e/ou modificação de variáveis como, por exemplo, um *preset* de tempo de um contador [CORETTI 1998].

Watchdog timer: alguns CLPs oferecem internamente à unidade de processamento um circuito denominado *watchdog timer*. Este circuito compõe-se de um temporizador com base de tempo fornecida pelo microprocessador cujo propósito é monitorar a varredura do CLP pela duração deste sinal. Se houver algum problema na varredura efetuada pelo CLP, o sinal deixará de ser cíclico. Nesse instante, o circuito *watchdog timer* vai detectar essa condição, desligando então as saídas para evitar problemas indesejáveis de operação do sistema [CORETTI 1998].

2.6.2 – Programação de um CLP

A programação de um CLP pode ser dividida em 3 categorias [WARNOCK 1997]:

- Linguagens de programação que compreendem desde linhas de comando de baixo nível semelhantes ao Assembler até linguagens de alto nível de estruturas semelhantes ao C e Pascal;
- Ferramentas baseadas em diagramas elétricos como *Ladder* (diagrama de relés) ou blocos de função;
- Ferramentas gráficas baseadas na evolução de estado do sistema.

A forma de programação pode ser através de teclas de funções e *display* de LCD (*liquid crystal display*) no próprio CLP, teclado especial com monitor ou interfaces gráficas executadas em um PC (*personal computer*). As duas últimas podem ser executadas *off-line* e depois “descarregadas” no CLP através de um protocolo de comunicação [WARNOCK 1997].

O modo como é feita a programação apresenta grande variação e é característico de cada fabricante e modelo. A programação através de teclas de função no próprio CLP pode ser feita por linhas de comando e simbologias proprietárias ou padronizadas como a *Ladder*. A descarga da programação remota realizada em PC ou terminal especial realiza-se através de protocolos de comunicação padronizados em portas seriais RS232 ou RS485 ou em rede industrial (*ethernet, fieldbus, etc.*) [WARNOCK 1997].

Capítulo 3 – Proposição

Como visto anteriormente, para que se tenha um processo de refusão de solda constante e preciso, é necessário que o perfil térmico aplicado ao produto não tenha variações. Desta forma a proposta aqui apresentada se baseia no monitoramento contínuo dos quatro principais itens de influência direta ao perfil térmico: temperatura aplicada em cada zona do forno, velocidade da esteira transportadora, integridade das resistências e dos insufladores de ar.

A proposta é ter um sistema de aquisição de dados baseado em sensores e um CLP de modo que quando houver variações acima ou abaixo dos dados previamente especificados, haja alertas visuais e sonoros, bem como a parada do processo imediatamente anterior, podendo desta forma segregar os produtos que estejam dentro do forno, garantindo assim a qualidade dos produtos manufacturados. Na figura 18 tem-se um diagrama de blocos simplificado desta proposta.

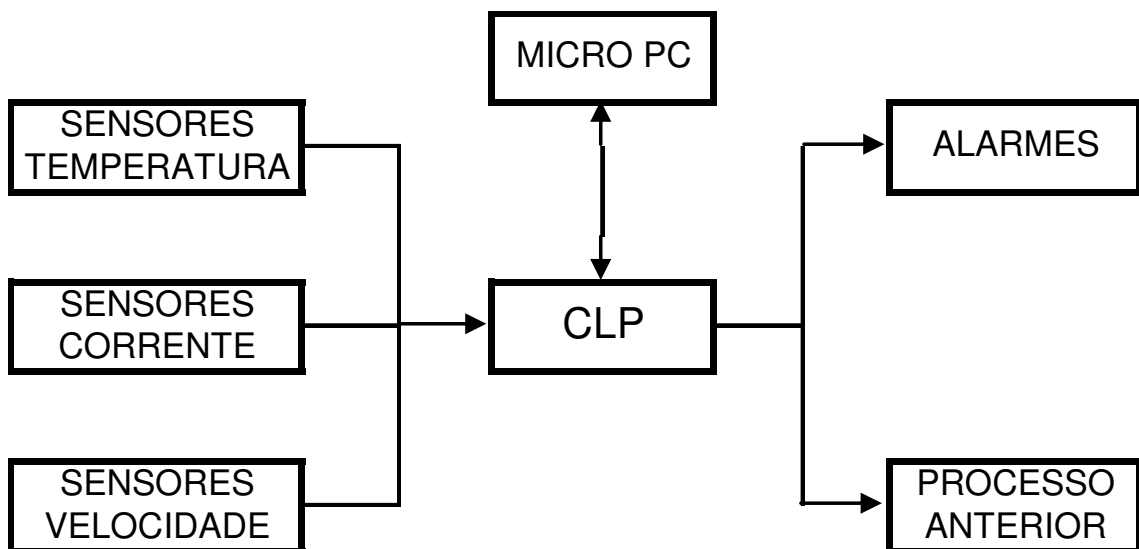


Figura 18 – Diagrama em blocos simplificado [JUSTI 2006]

O CLP será o responsável pelo monitoramento e controle de todo o processo. Pode-se dividir o sistema em três partes distintas, entrada de dados, saída de dados e comunicação com micro PC.

Entrada de Dados – a princípio serão utilizados os sensores de temperatura já existentes nas zonas dos fornos (termopares), bem como o sensor de velocidade da esteira transportadora de placas (encoder), fornecendo assim a temperatura interna de cada zona e a velocidade da esteira. Para se monitorar as resistências e os insufladores de ar serão utilizados sensores de corrente em cada um dos elementos, de modo que através da variação de corrente pode-se identificar a situação do elemento monitorado, por exemplo: se a corrente aumenta drasticamente em um insuflador de ar, isso é sinal que o mesmo está realizando um trabalho forçado, podendo estar com seus rolamentos danificados.

Saída de Dados - após o processamento caso haja alguma anormalidade, duas ações serão realizadas: Alarmes sonoros e visuais serão acionados, alertando os usuários do sistema quanto ao problema detectado e também será enviado um sinal de parada para o equipamento imediatamente anterior ao forno, normalmente uma esteira transportadora de placas, paralisando a produção.

Comunicação com PC – esta comunicação se faz necessária, pois cada produto produzido possui seu perfil térmico ideal. Assim toda vez que se tenha uma troca de modelos na linha de produção, os dados do CLP devem ser carregados novamente.

Como o perfil térmico efetivamente aplicado na placa de circuito impresso não é exatamente igual ao perfil monitorado pelos sensores, é preciso que haja uma correlação entre ambos. Inicialmente será necessário que se faça uma coleta de dados manualmente, utilizando-se o processo usual, ou seja, preparando uma placa com sensores de temperatura acoplada ao coletor de dados e passando-os pelo forno quantas vezes forem necessárias até que se tenha o perfil térmico desejado. De posse desses dados pode-se realizar a correlação

entre o perfil térmico aplicado na placa de circuito e os elementos que serão monitorados: temperatura da zona, resistência elétrica, insuflador de ar e velocidade da esteira transportadora.

Capítulo 4 – Material e Método

Com o objetivo de validar a proposta sugerida foram definidos os materiais, equipamentos e método para realização das simulações e experimentos, conforme mostrado nos itens abaixo:

4.1– LISTA DE MATERIAL.

Tabela 3 – Lista de Materiais

Equipamento	Característica	Qtde
Forno de Refusão de solda Fabricante: Conceptronics	10 zonas de aquecimento	1
Coletor de dados Fabricante: Mole	Modelo Super Mole 2000	1
Termopares	Tipo K	1
Crouzet Logic Software	Simulação CLP	1
Multisim 2001	Simulação circuitos eletrônicos	1
Planilha para correlação de dados.	Projetada em Microsoft Excel.	1
Notebook Sony Vaio	Pentium 4 com 750 MB de memória RAM.	1

4.2 – MÉTODO

O método utilizado para a realização do trabalho foi dividido em 5 etapas, sendo: primeira etapa, a identificação de produtos existentes no mercado capazes de produzir os sinais necessários para o controle do processo de refusão de solda; segunda etapa, definição dos circuitos necessários para realizar a interface entre os sensores e o CLP; terceira etapa, verificação da correlação entre os dados reais do processo e os dados monitorados pelo CLP; quarta etapa, programação do CLP; quinta etapa, funcionamento integrado do sistema.

4.2.1 – Identificação de produtos comerciais

Através de uma pesquisa de mercado foram verificados quais os tipos de sensores existentes que poderiam atender aos requisitos do projeto. Basicamente o objetivo era identificar os sensores de corrente e os amplificadores para termopares, pois os outros elementos já estão presentes no processo estudado.

4.2.1.1 – Sensor de corrente

A proposta visa utilizar 2 sensores de corrente em cada zona do forno, sendo um para verificação da integridade das resistências elétricas e o outro para verificação do funcionamento dos insufladores de ar.

Entre os vários tipos pesquisados, foi escolhido o sensor de corrente do fabricante Secon, o SECOHR 25C 010LF 220, que é um sensor de corrente elétrica por efeito Hall realimentado usado para medir correntes AC com isolamento galvânica e sinal de saída de 0 a 10 volts.

Suas características técnicas são:

- Corrente nominal: 25A
- Faixa de medida: (0-25) Aac (60 Hz)
- Erro máximo @ 70 °C: +/- 1% da nominal
- Tensão de alimentação: 220 VAC 60 Hz
- Temperatura de operação: 0 a 70 °C
- Vmáx (saída): < 13V (p/ correntes > 29 A)
- Tempo de resposta: 350 ms

A seguir a figura 19 mostra o diagrama de conexões:

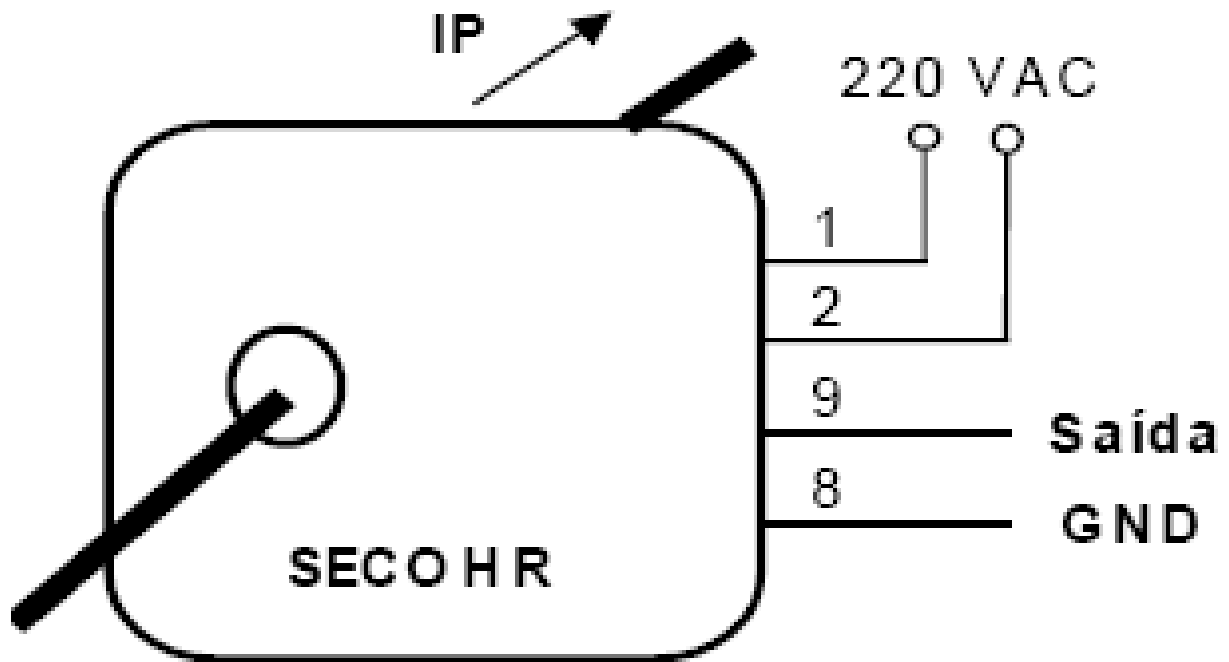


Figura 19 – Diagrama de conexão do SECOHR

4.2.1.2 – Amplificador para Termopar

Como as tensões geradas pelos termopares são da ordem de mili-volts, faz-se necessária a utilização de algum meio para se amplificar o sinal gerado para um valor que se possa manipular mais adequadamente pelo CLP.

Desta forma foi escolhido como base para esta amplificação o circuito integrado da *Analog Devices* AD595, que é um amplificador de termopar com compensação de junção a frio. O AD595 foi projetado para utilizar especificamente os termopares do tipo K, de modo, que em sua saída tenha-se uma taxa de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$.

A tabela 4 mostra os valores de tensão de saída ideais para o AD595, considerando-se que a temperatura ambiente seja de 25°C e que a tensão de alimentação seja de -5 e $+15$ volts:

Tabela 4 - Tensão de saída X temperatura no termopar [DATASHEET AD595]

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021
-100	-4.632	-893	-3.553	-876
-80	-3.785	-729	-2.920	-719
-60	-2.892	-556	-2.243	-552
-40	-1.960	-376	-1.527	-375
-20	-.995	-189	-.777	-189
-10	-.501	-94	-.392	-94
0	0	3.1	0	2.7
10	.507	101	.397	101
20	1.019	200	.798	200
25	1.277	250	1.000	250
30	1.536	300	1.203	300
40	2.058	401	1.611	401
50	2.585	503	2.022	503
60	3.115	606	2.436	605
80	4.186	813	3.266	810
100	5.268	1022	4.095	1015
120	6.359	1233	4.919	1219
140	7.457	1445	5.733	1420
160	8.560	1659	6.539	1620
180	9.667	1873	7.338	1817
200	10.777	2087	8.137	2015
220	11.887	2302	8.938	2213
240	12.998	2517	9.745	2413
260	14.108	2732	10.560	2614
280	15.217	2946	11.381	2817
300	16.325	3160	12.207	3022
320	17.432	3374	13.039	3227
340	18.537	3588	13.874	3434
360	19.640	3801	14.712	3641
380	20.743	4015	15.552	3849
400	21.846	4228	16.395	4057
420	22.949	4441	17.241	4266
440	24.054	4655	18.088	4476
460	25.161	4869	18.938	4686
480	26.272	5084	19.788	4896

A figura 20 mostra o circuito típico do AD595, e sua pinagem é mostrada na figura 21.

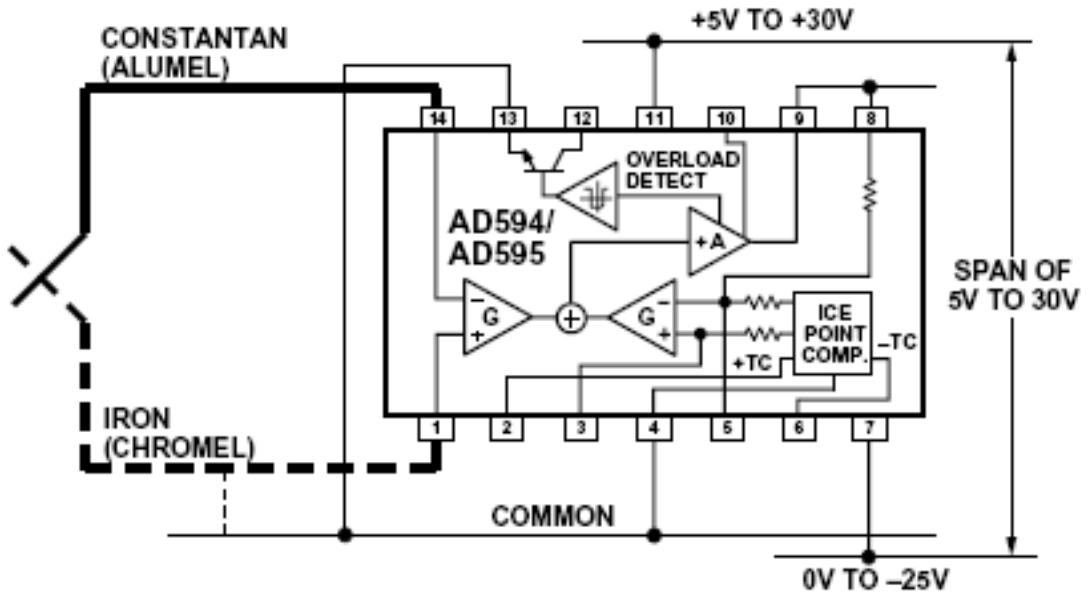


Figura 20-Circuito típico AD595 [DATASHEET AD595]

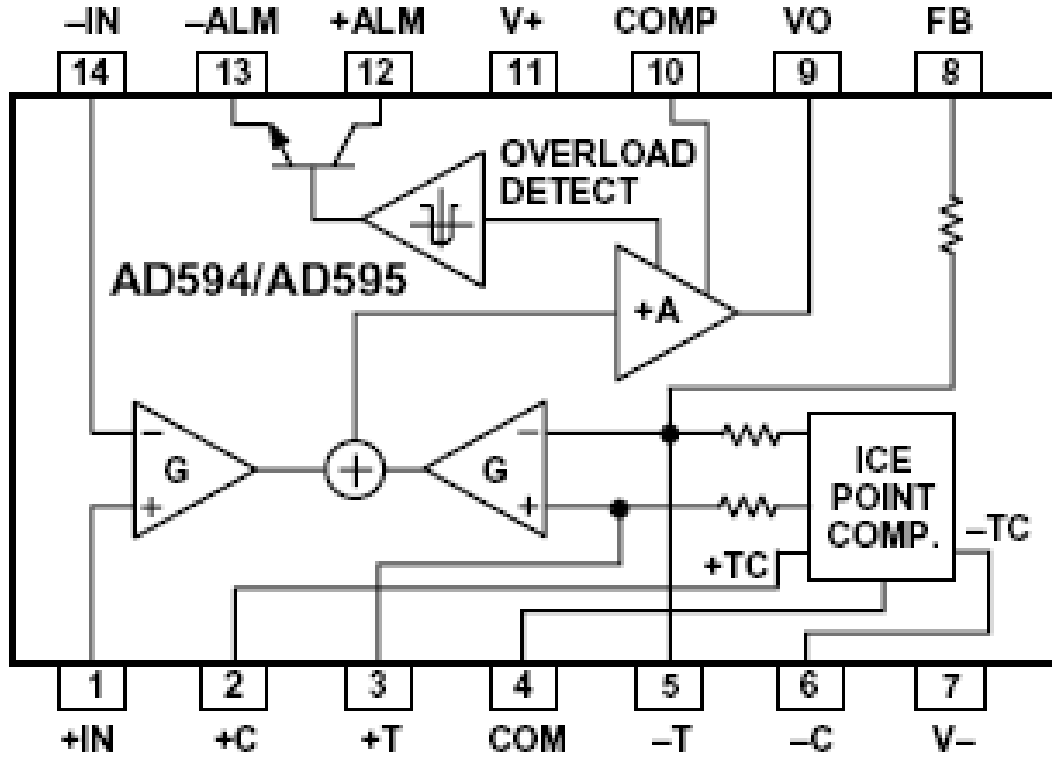


Figura 21-Pinagem AD595 [DATASHEET AD595]

Onde os principais pinos são:

- 1 e 14 - entradas do termopar;
- 9 - saída de tensão;
- 11- Alimentação +Vcc;
- 7- Alimentação - Vcc;
- 4- GND

4.2.2 – Interfaces

Para coleta de dados para o CLP foram desenvolvidas interfaces eletrônicas, cuja função principal será transformar os dados analógicos em sinais digitais.

As interfaces foram utilizadas para monitoramento dos sinais provenientes das resistências elétricas, dos insufladores de ar e do encoder.

4.2.2.1 – Interface para resistências elétricas

Para as resistências elétricas, o importante é garantir que as mesmas possuam correntes elétricas circulando, pois quando as mesmas se rompem as correntes elétricas passam a ter valor nulo, anulando desta forma o efeito Joule da resistência.

A interface se baseará em um comparador ativo utilizando um amplificador operacional que irá comparar o valor do sensor de corrente, referente à resistência elétrica, com um sinal pré-estabelecido em 0,2 volts, que proporcionalmente equivale a 0,5 ampéres.

Quando a corrente que circula pela resistência gerar uma tensão menor que 0,2 volts na saída do sensor de corrente (SC), o comparador mudará seu sinal de saída para +Vcc, que será considerado como um bit “1” no CLP.

O circuito elétrico é apresentado na figura 22:

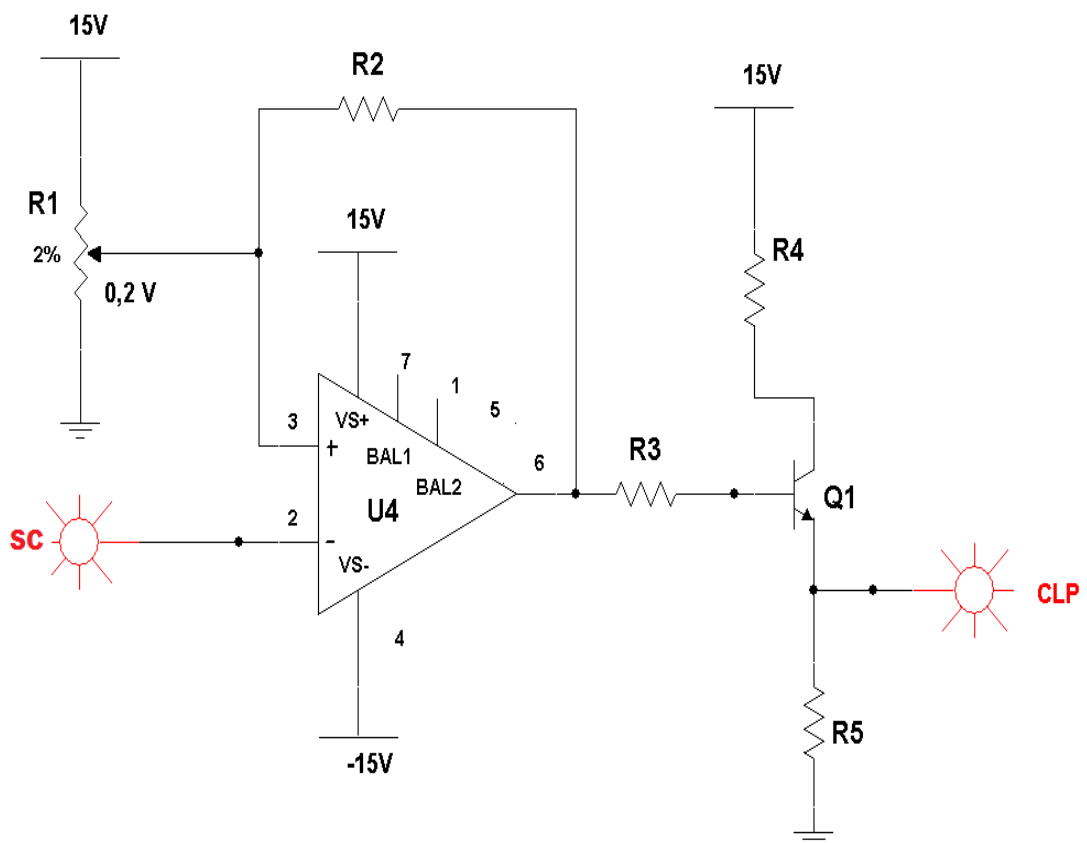


Figura 22-Interface para resistências

4.2.2.2 – Interface para insufladores de ar

No caso dos insufladores de ar, o conceito a ser observado é que além do que ocorre nas resistências elétricas (circuito aberto), também há a possibilidade de se ter aos poucos o travamento do motor, que como consequência direta será o aumento gradativo da corrente nominal do circuito.

Desta forma, haverá um circuito equivalente ao já demonstrado nas resistências elétricas para verificar a ausência de corrente elétrica, e um outro circuito que verificará o aumento da corrente até um máximo de 30% acima do valor nominal.

O primeiro circuito é exatamente igual ao referente às resistências elétricas, já o segundo, apesar de ser também um comparador, a diferença está no valor a ser comparado que será de 2,6 volts, que equivale a 6,5 ampéres de corrente elétrica e que a saída será acionada quando o valor for superior aos 2,6 volts do *set point* (figura 23).

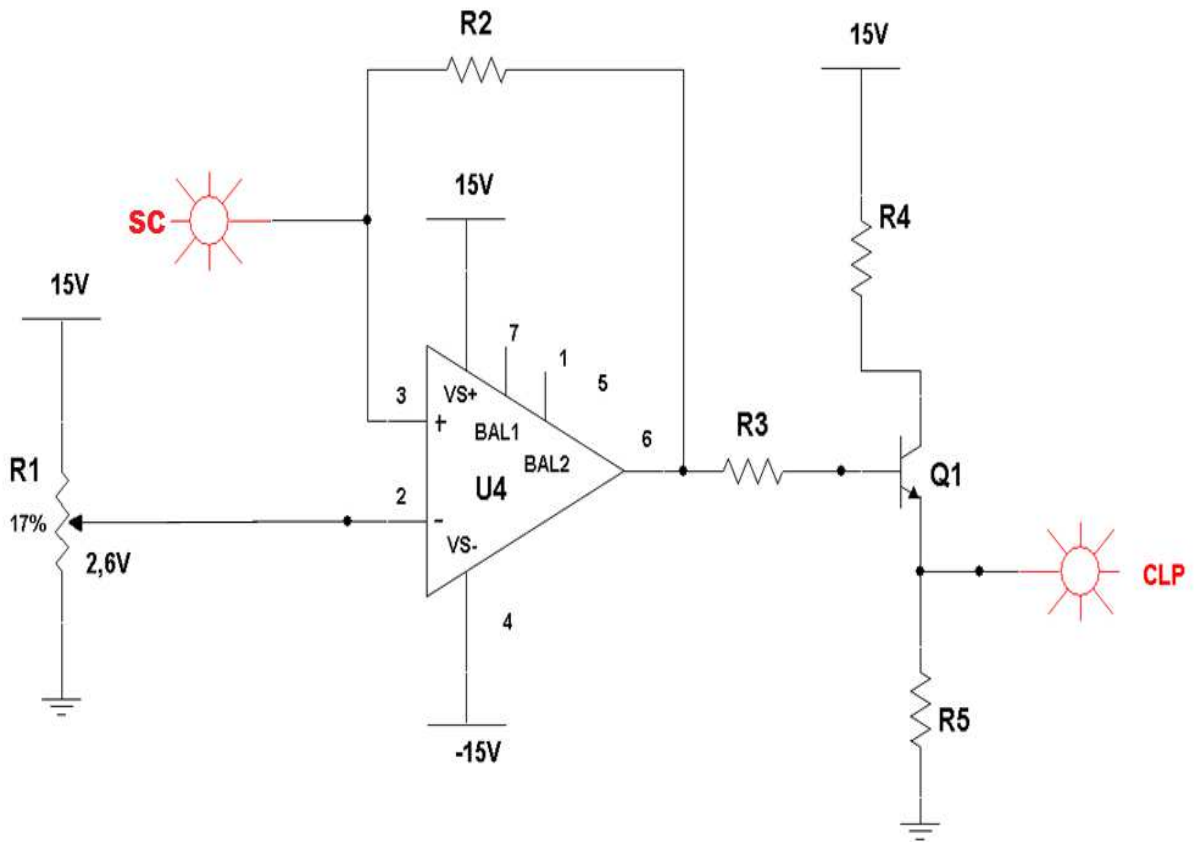


Figura 23-Interface para insufladores

4.2.2.3 – Interface para encoder

Este circuito irá enviar ao CLP um valor de tensão equivalente à velocidade da esteira transportadora que está sendo monitorada pelo encoder.

Pode-se dividir o princípio de funcionamento do circuito em duas partes. Na primeira tem-se um amplificador operacional cuja função é transformar a forma de onda vinda do encoder de uma onda quase quadrada em uma onda quadrada perfeita. Na segunda parte do circuito através de um circuito integrado LM331 a frequência desta onda quadrada será transformada em um valor de tensão proporcional a frequência de entrada.

4.2.4 – Programação do Controlador Lógico Programável (CLP)

Através do simulador “CROUZET LOGIC SOFTWARE“ a programação do CLP foi desenvolvida, seguindo uma lógica de verificação das condições ideais para o processo de refusão de solda *lead free*, ou seja, após a estabilização das zonas de aquecimento, o sistema irá monitorar constantemente se todos os parâmetros se mantêm dentro dos limites e ou condições condizentes para uma boa qualidade do produto.

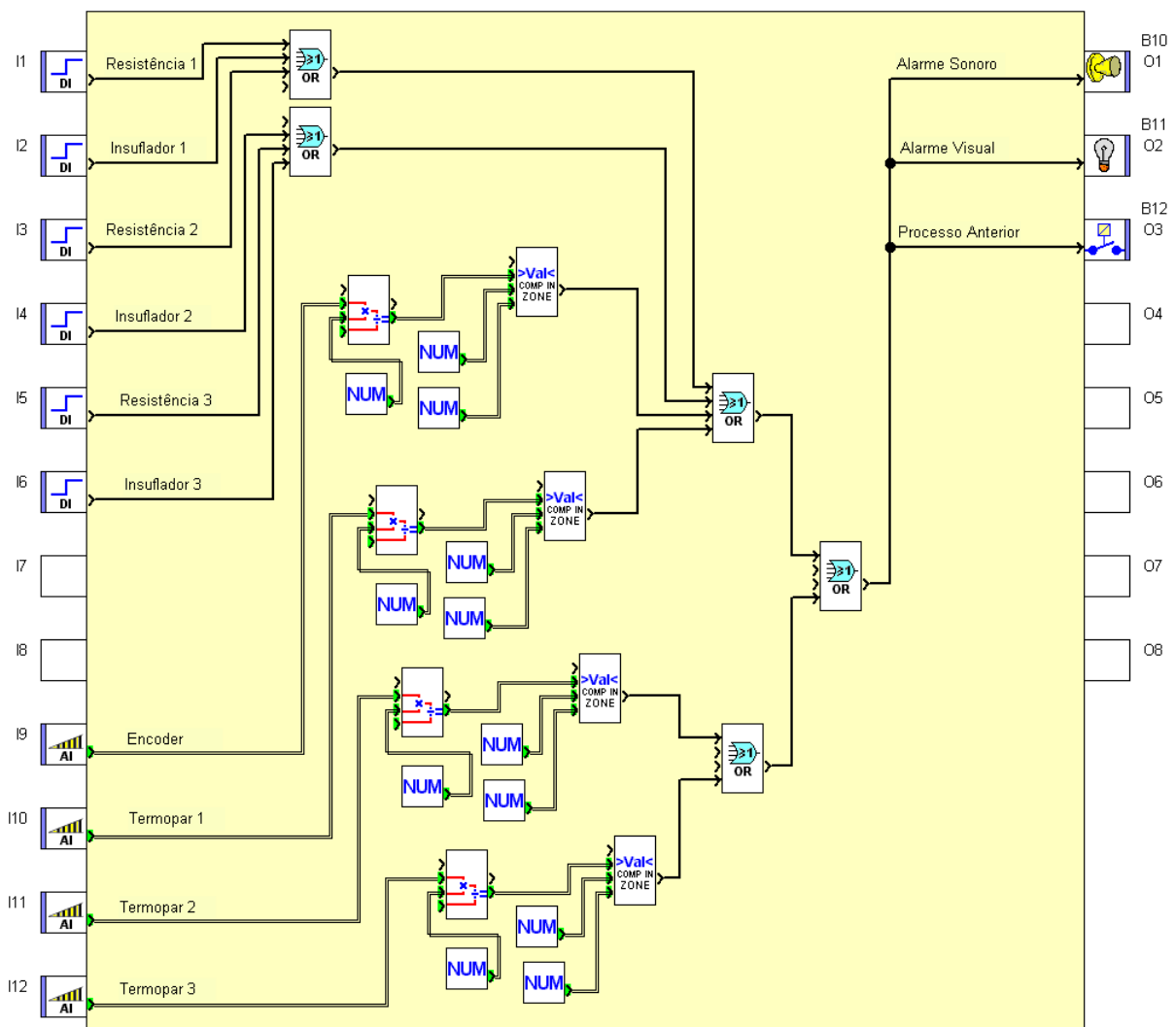


Figura 25 - Programação do CLP

O programa do CLP utiliza-se dos sinais provenientes das interfaces para verificar se o processo de refusão de solda esta dentro dos parâmetros aceitáveis de qualidade.

As entradas digitais de I1 até I6 são utilizadas para receber os sinais referentes às resistências elétricas e dos insufladores de ar, de modo que se qualquer uma delas estiver na condição de bit 1, as saídas passam a ter nível 1 também, acionando os alarmes sonoro e visual, bem como mandando um sinal para parar o processo anterior (esteira transportadora).

As entradas analógicas de I9 até I12 são utilizadas para receber os sinais provenientes do encoder e dos termopares. Basicamente a lógica para processamento destas informações são semelhantes, diferenciando-se apenas os limites de comparação. O sinal de entrada passa por um multiplicador por dez que posteriormente é comparado com dois valores de acordo com a tabela 7. Se o valor de entrada não estiver dentro dos limites estabelecidos, os alarmes são acionados.

Tabela 7 – Limites das entradas analógicas

	VALOR ENTRADA	X 10	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
ENCODER	0,7	7	5	9
TERMOPAR 1	1,02	10,2	8	12
TERMOPAR 2	1,82	18,2	15	21
TERMOPAR3	2,41	24,1	20	28

4.2.5 – Funcionamento integrado do sistema

O objetivo é verificar como será a integração de todo o sistema. Através do diagrama em blocos da figura 26, pode-se ver todos os recursos utilizados neste projeto. Têm-se as interfaces do encoder e dos sensores de corrente, além dos termopares e seus respectivos amplificadores, o CLP, bem como as interações com o mundo externo (sinal sonoro, etc.). Ao operador da linha de produção não é reservada nenhuma tarefa especial para que o sistema funcione corretamente, sua função será comunicar a engenharia de processo quando do acionamento dos alarmes do sistema.

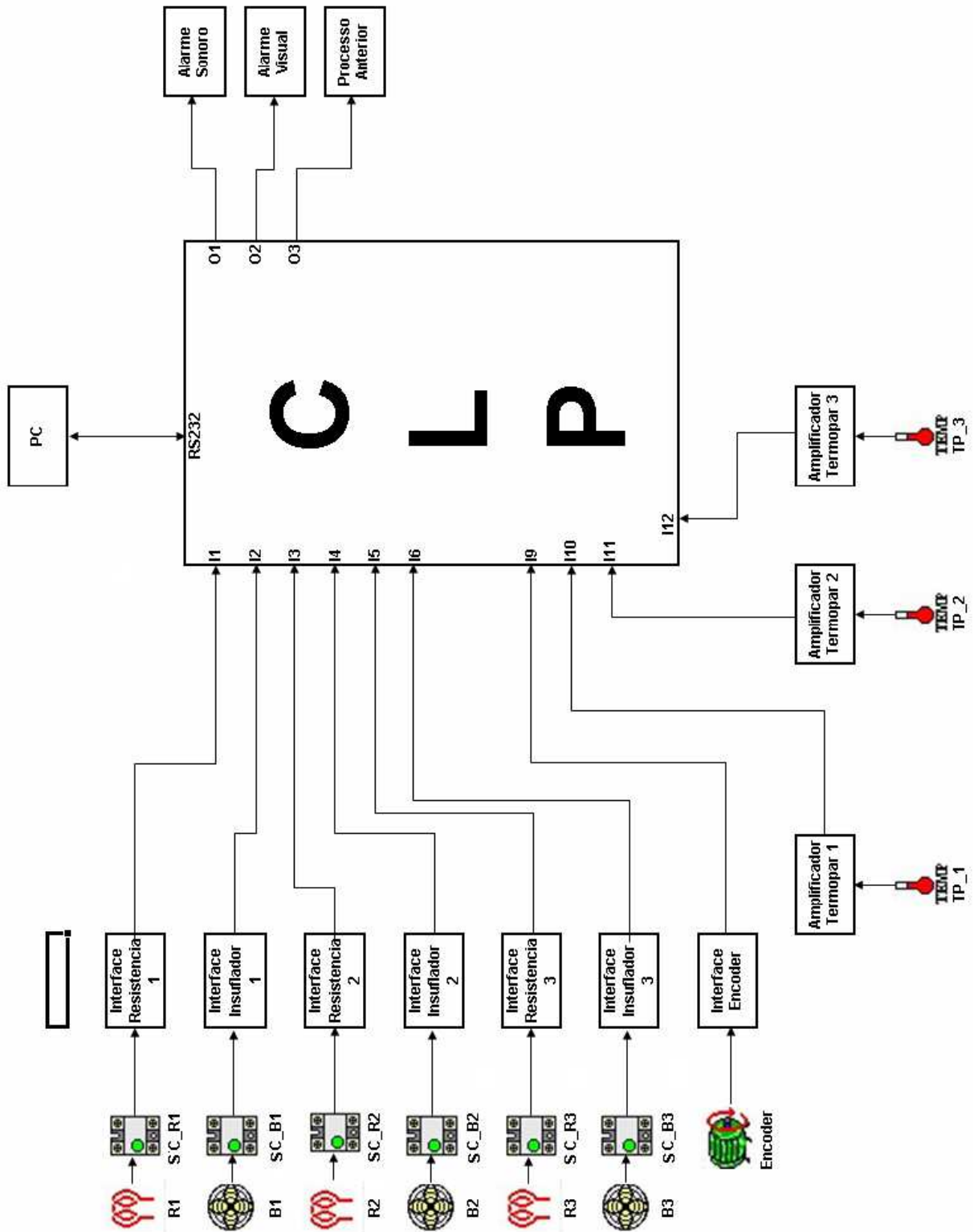


Figura 26 - Diagrama em bloco do sistema

Capítulo 5 - Resultados e Discussão

O resultado deste projeto depende do funcionamento das várias partes do sistema, de forma que para chegar-se ao funcionamento pleno do mesmo, foram realizadas simulações e experimentos separadamente, de forma que no final tenha-se uma somatória de resultados e dados capazes de fornecer as condições para implementação física e total no processo produtivo.

5.1 – Simulação da Interface para resistência elétrica e insuflador de ar

Através do *software* simulink foi possível realizar as simulações da interface para as resistências elétricas e insuflador de ar, uma vez que as duas são praticamente iguais.

A figura 27 mostra o resultado da simulação em forma de gráfico em um osciloscópio virtual.

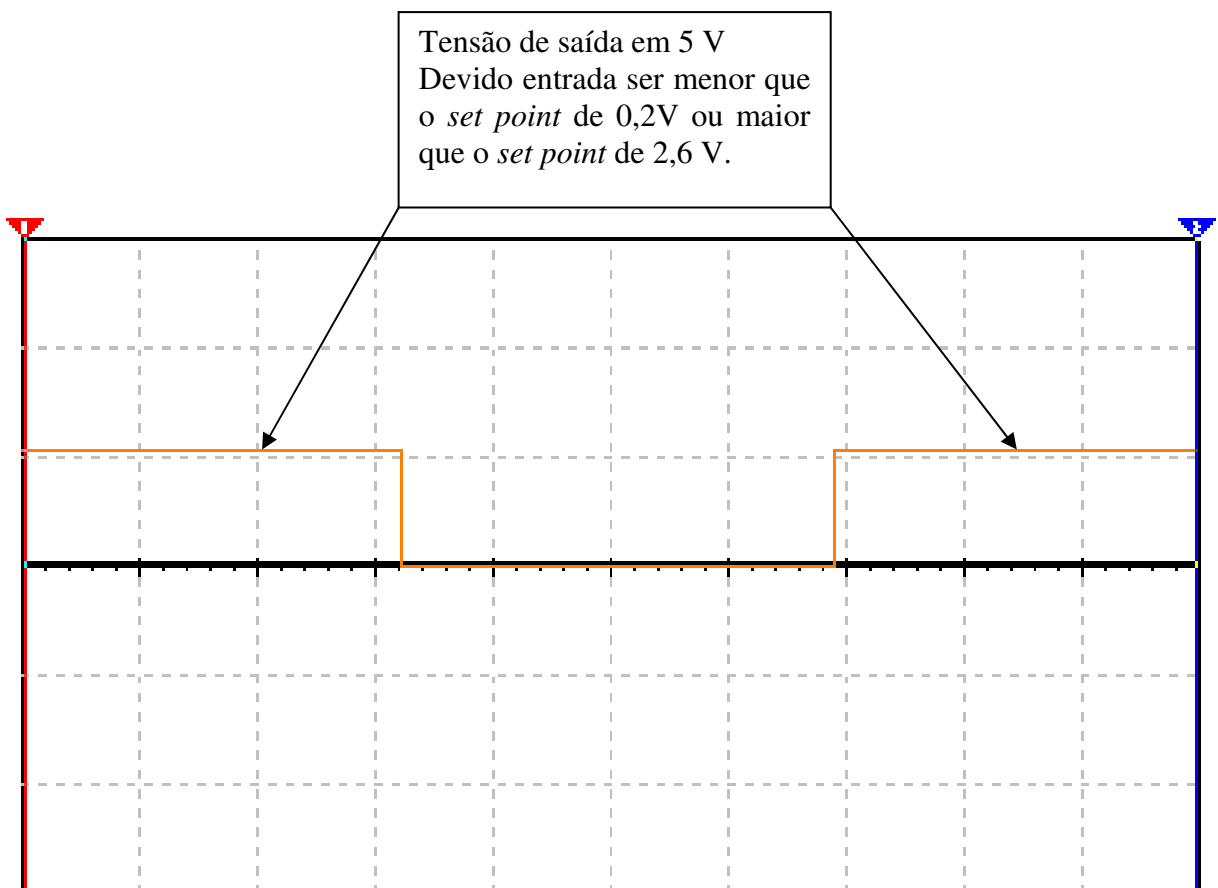


Figura 27 – Tensão de saída do circuito comparador

5.2 – Experimento da interface para *encoder*

Para se verificar a eficiência do circuito proposto de interface para encoder, foi montado em bancada e coletados os dados que são apresentados na tabela 8 e no gráfico da figura 28.

Tabela 8 – Relação Frequência x Tensão

Frequência (Hz)	Tensão de Saída (V)
50	0,34
100	0,7
200	1,4
300	2,04
400	2,78

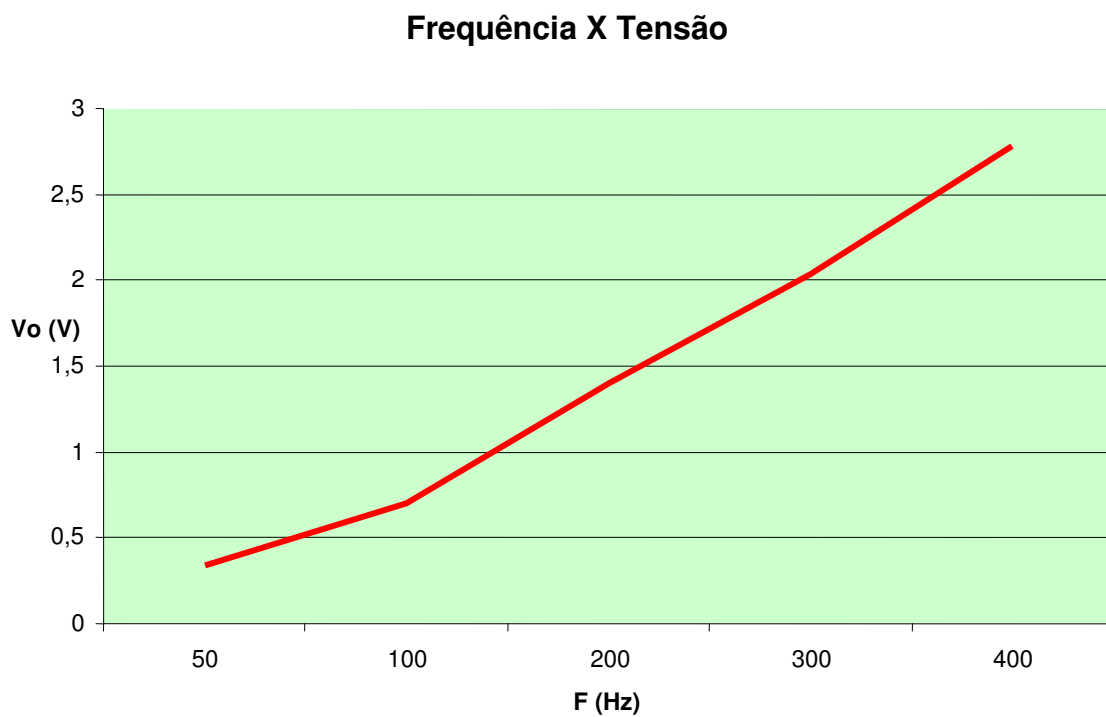


Figura 28 – Gráfico Frequência X Tensão

5.3 – Experimento do amplificador para termopar

Realizando-se a montagem do circuito amplificador para termopar, foi possível levantar os dados da tabela 9 e gerar o gráfico da figura 29.

Tabela 9 – Relação Temperatura x Tensão

Temperatura (°C)	Tensão de Saída (V)
50	0,51
80	0,81
100	1,05
150	1,52
200	2,02
245	2,46

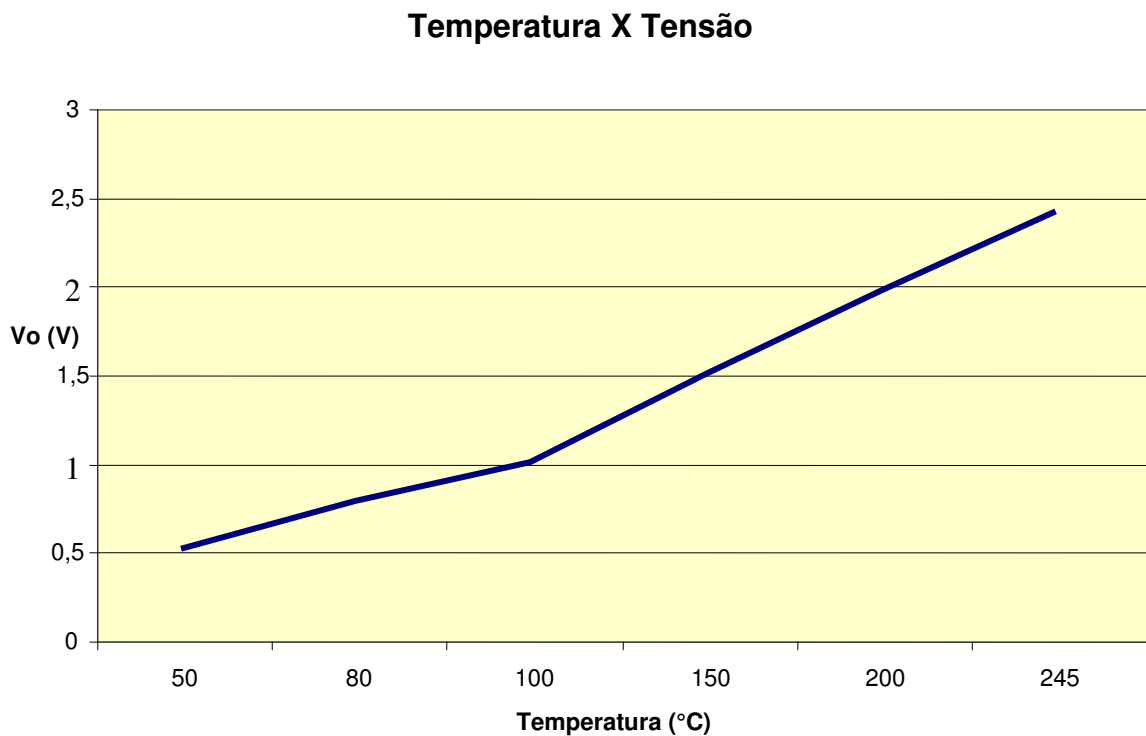


Figura 29 – Gráfico Temperatura X Tensão

5.4 – Simulação da programação do CLP

Foram realizadas todas as possíveis variações de entrada e observado o comportamento da saída do CLP. O objetivo de se parar o processo e alertar o operador desta condição não desejada, foi plenamente alcançado.

A figura 30 mostra o comportamento do circuito, caso tenha-se a resistência 1 em aberto. Tem-se um sinal “1” em I1 que irá se transferir pelas portas OU até acionar as saídas O1, O2 e O3 (caminho em vermelho).

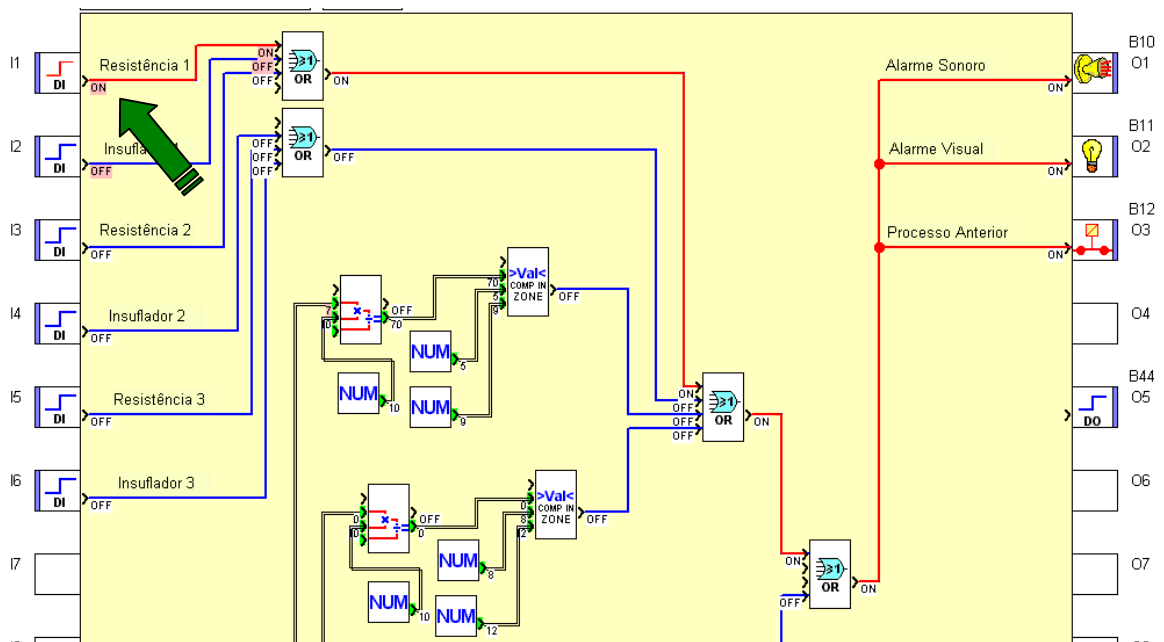


Figura 30 – Resistência 1 em aberto

Na figura 31 foi simulada a situação de se ter o insuflador de ar número 3 com problemas de travamento. Do mesmo modo ter-se-á um sinal “1” na entrada I6 de modo que o mesmo irá se propagar pelas portas OU do circuito até que as saídas O1, O2 e O3 sejam acionadas (caminho em vermelho).

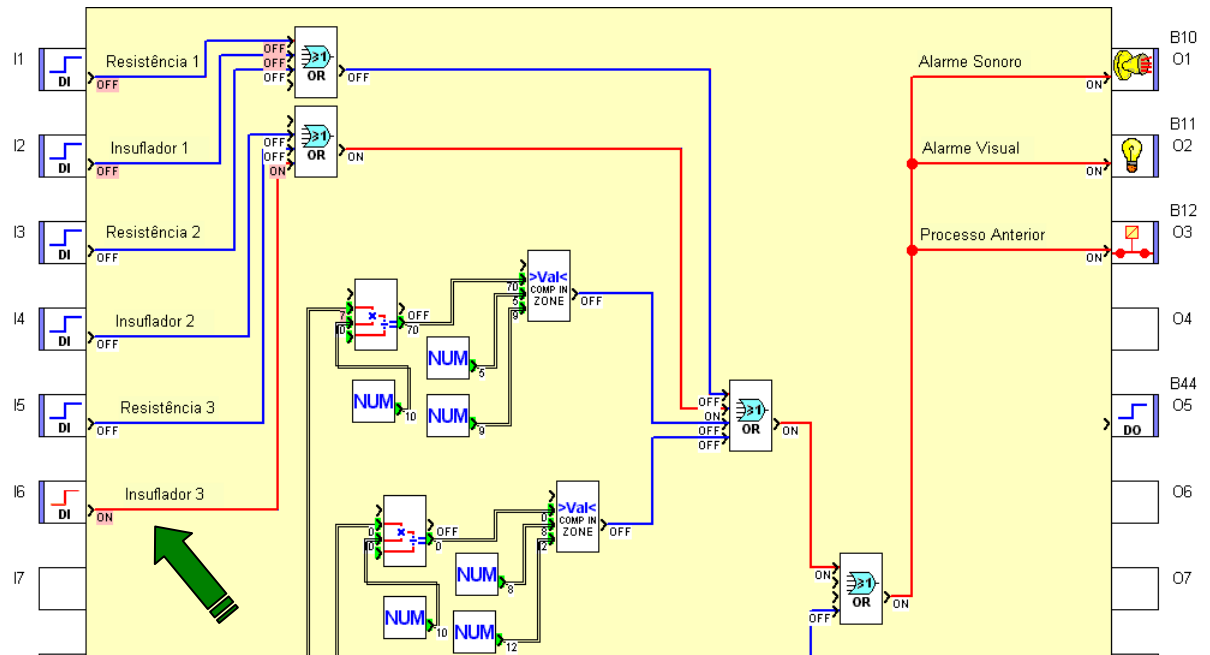


Figura 31 – Insuflador 3 com problemas

A figura 32 mostra a simulação de se ter algum problema na velocidade da esteira ou na temperatura da zona do forno. O valor de I9 (*encoder*) vale zero, que multiplicado por 10 continua valendo zero, que não está entre os intervalos de 5 a 9 do comparador numérico, elevando sua saída para “1” que irá ser transportado pelas portas OU até acionar as saídas O1, O2 e O3 do CLP (primeiro caminho em vermelho). Nas entradas I10, I11 e I12 foram colocados os valores 2, 1 e 3 que quando comparados com os valores pré-estabelecidos nos comparadores numéricos, também estão fora dos limites permitidos, elevando suas respectivas saídas para “1”, que da mesma forma que o circuito anterior, serão transportados pelas portas OU até acionar as saídas do CLP (2º, 3º e 4º caminho em vermelho).

Capítulo 6 – Conclusão

Analisando-se os resultados obtidos individualmente nos experimentos e simulações realizadas, conforme segue abaixo:

1. As interfaces para resistência elétrica e insuflador de ar que foram simuladas através do *software* simulink, apresentaram os resultados esperados, acionando um nível “1” quando a entrada estava fora do *set point* desejado;
2. A interface para sensor de velocidade da esteira, após montagem em laboratório, pode-se levantar uma curva característica entre frequência e tensão, que apresentou uma linearidade quase perfeita a partir da frequência de 100 Hz;
3. O amplificador do termopar, tem em sua curva características duas regiões lineares bem definidas, a primeira até os 100 °C e segunda em temperaturas superiores aos 100 °C, de forma que pode-se levantar os valores para cada zona do forno desejada;
4. A integração do projeto foi realizada pela simulação de um programa de CLP, onde se captou os dados provenientes das várias interfaces e os comparou com os dados das tabelas 5, 6 e 7, acionando ou não os alarmes sonóros/visual bem como enviando um sinal para parada do processo de produção;

Pode-se concluir com os resultados obtidos pelos experimentos e simulações realizadas, que é possível controlar efetivamente um processo de refusão de solda *lead-free* através do aproveitamento de recursos já existentes e disponíveis nos equipamentos, bem como de circuitos amplamente estudados pela comunidade científica (comparadores, etc.), utilizando-se uma automação não muito complexa, facilitada em muito pelo uso do CLP.

Como sugestão futura para esta linha de pesquisa, além da implementação física total do projeto, fica também o aumento do número de zonas monitoradas pelo sistema de controle, bem como a possibilidade de também se atuar para resolução do problema de forma automática.

Referências Bibliográficas

[01] CORETTI, J.A. 1998 – Manual de treinamento básico de controlador lógico programável – Centro de treinamento SMAR.

[02] DIRECTIVE 2002/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL- 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.

[03] ENCODER (2006) - http://en.wikipedia.org/wiki/rotary_encoder

Acesso em: 08.12.2006

[04] GANESAN, SANKA / PECHT, MICHAEL (2004)- Lead Free Electronics – CALCE EPSC Press -University of Maryland

[05] HWANG, JENNIE S. (2005) – Implementing Lead Free Electronics – Mc Graw Hill

[06] DATASHEET AD595 -

http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/analogdevices/421725987AD594_5_c.pdf

Acesso em 28/12/2006

[07] OLIVEIRA, W.D. / COSTA, R.S e outros (2005) – Revista Horizonte Científico nº 6– Universidade federal de Uberlândia

[08] SIMPSON, C.D. (1994) – Programmable logic controllers – Prentice Hall.

[09] HONEYWELL (2008) - Hall effect sensing and applications

<http://honeywell.com/sensing> Acesso em: 04.08.2008

[10] TERMOPARES-1 (2006) - http://www.iope.com.br/index_port.htm

Acesso em: 20.12.2006

[11] TERMOPARES-2 (2006) - <http://en.wikipedia.org/wiki/thermocouple>

Acesso em: 20.12.2006

[12] TOLOMEI, H / XAVIER, C / LIMA, E / JUSTI, M / CARDOSO, J (2004) – Trabalho de conclusão de curso – Geração em paralelo com sistema elétrico da concessionária local – Sincronismo – Faculdades Integradas Torricelli

[13] WASSINK, R.J.K. (1989) – Soldering in electronics- 2nd edition – Electrochemical Publication Limited.

[14] MORIYA, J. (2006) – Apostila de treinamento Lead Free – TecSolda consultoria.

[15] KESTER – (2006) – Descritivo técnico da pasta de solda Kester 256

[16] JUSTI, M.A. / LOMBARDI, J.C. / BIZARRIA, F.C.P. (2006) – Automatização do processo de refusão para soldagem *Lead Free* – SAE BRASIL

[17] WARNOCK, I.G. (1997) – *Programmable Controllers – Operation and Application* – Prentice Hall Europe

ANEXO A – AMPLIFICADOR OPERACIONAL

A.1 – AMPLIFICADOR OPERACIONAL IDEAL

O AmpOp ideal constitui um modelo simplificado de um amplo conjunto de amplificadores de tensão atualmente existentes no mercado. Caracteriza-se pelas seguintes propriedades (figura A1):

- (i) impedância de entrada infinita;
- (ii) impedância de saída nula;
- (iii) ganho de tensão infinito;
- (iv) ausência de qualquer limitação em frequência e em amplitude.

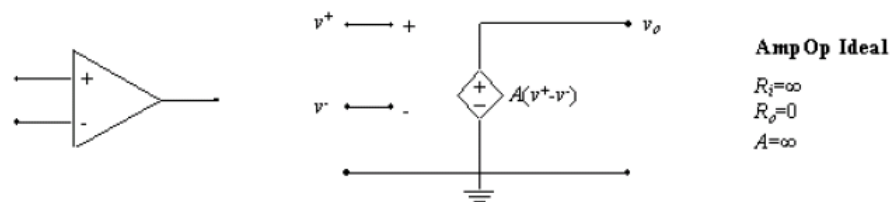


Figura A1 - Amplificador operacional ideal

A principal consequência do conjunto de propriedades apenas enunciado é, na prática, a possibilidade de estabelecer um curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada do AmpOp. Com efeito, a existência de uma tensão finita na saída só é compatível com um ganho infinito desde que a diferença de potencial entre os dois terminais de entrada seja nula. A natureza virtual deste curto-circuito deve-se à coexistência de uma igualdade entre tensões sem ligação física entre terminais. Na figura A2 ilustra-se o significado prático de um curto-circuito virtual.

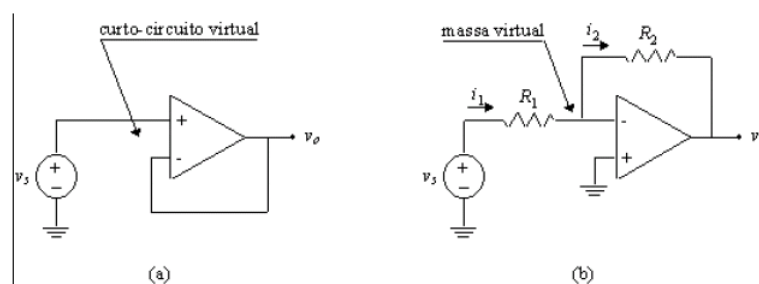


Figura A2-Curto-circuito virtual

Por exemplo, no caso da montagem em (a) a relação entre as tensões nos nós é dada pela equação (1):

$$v_o = v^- = v^+ = v_s \quad (1)$$

Isto é, a tensão na saída do AmpOp segue a da fonte de sinal aplicada na entrada. Por outro lado, no caso da montagem representada em (b) verifica-se o que é mostrado na equação (2):

$$v^- = v^+ = 0 \quad (2)$$

Ou seja, que o terminal negativo do amplificador se encontra ao nível da massa sem, no entanto se encontrar fisicamente ligado a ela. Diz-se então que o terminal negativo do amplificador operacional constitui uma massa virtual.

A.2 - MONTAGENS BÁSICAS

O AmpOp pode ser utilizado em duas configurações básicas: a montagem inversora e a montagem não-inversora. Os circuitos estudados neste capítulo constituem todos eles ou variações ou combinações destas duas configurações básicas.

No que diz respeito às metodologias de análise de circuitos com AmpOps, existem basicamente as seguintes duas alternativas:

(i) uma que assume a presença de um curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada do AmpOp (em conjunto com correntes nulas de entrada);

(ii) e uma outra que considera o AmpOp como uma fonte de tensão controlada por tensão e utiliza as metodologias convencionais de análise de circuitos.

Adiante se verá que a primeira metodologia é de mais simples aplicação aos circuitos com AmpOps ideais, ao contrário da segunda, que se destina essencialmente à análise de circuitos com AmpOps reais, neste caso com limitações em ganho, frequência, e impedâncias de entrada e de saída.

A.2.1 Montagem Inversora

Considere-se na figura A3 o esquema elétrico da montagem inversora do Amplificador Operacional (AmpOp.).

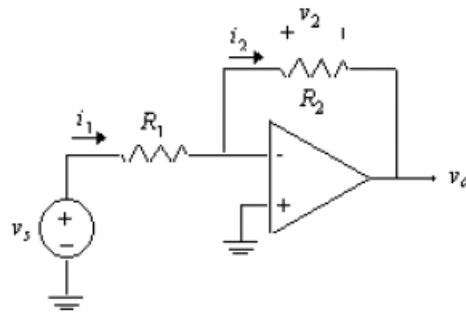


Figura A3-Montagem Inversora

Tendo em conta o fato da existência de um curto-circuito virtual entre os dois terminais de entrada, o que implica a igualdade $v_+ = v_- = 0$, e ainda o fato de as correntes nos nós de entrada serem nulas, $i_- = i_+ = 0$, verifica-se então que:

$$i_1 = i_2 = \frac{v_s - 0}{R_1} = \frac{v_s}{R_1} \quad (3)$$

e que, portanto,

$$v_o = -v_2 = -R_2 \frac{v_s}{R_1} \quad (4)$$

Como tal, o ganho de tensão da montagem é dado por:

$$\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (5)$$

O qual é apenas função do cociente entre os valores das resistências R_2 e R_1 .

A.2.2 Montagem Não-Inversora

Considere-se na figura A4 a montagem não inversora do AmpOp.

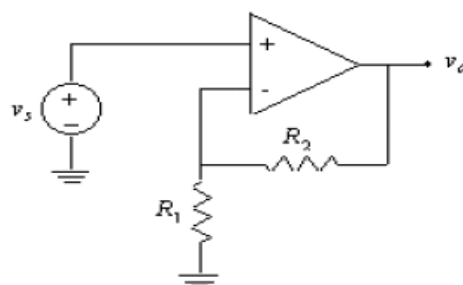


Figura A4-Montagem não inversora

A existência de um curto-circuito virtual entre os nós de entrada do amplificador permite escrever a igualdade entre as três tensões:

$$v^- = v^+ = v_s \quad (10)$$

que em conjunto com a equação do divisor resistivo na saída:

$$v^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o \quad (11)$$

conduz à relação de ganho:

$$\frac{v_o}{v_s} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (12)$$

O ganho de tensão desta montagem é positivo, superior à unidade e, mais uma vez, dependente apenas do cociente entre os valores das resistências R_1 e R_2 .

A.2.3 Amplificador Somador Inversor

A figura A5 mostra o circuito básico no qual todas as resistências são diferentes. O circuito é derivado do amplificador inversor já visto e a obtenção da expressão da tensão de saída em função das entradas é feita considerando que o ganho do AO em malha aberta é infinito e que a impedância de entrada é infinita.

É importante notar que as tensões de entrada podem ser alternadas ou contínuas, e em qualquer instante o circuito soma e inverte todas as tensões de entrada.

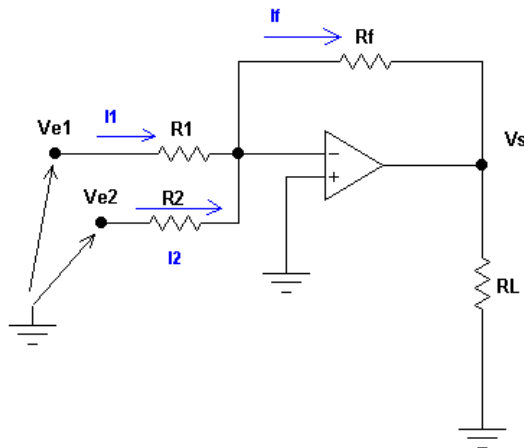


Figura A5-Somador inversor

A expressão da tensão de saída em função das entradas é dada por:

$$V_S = -R_f \left(\frac{v_{e1}}{R_1} + \frac{v_{e2}}{R_2} \right) \quad (13)$$

Caso as resistências de entrada sejam iguais resulta o circuito da figura A6.

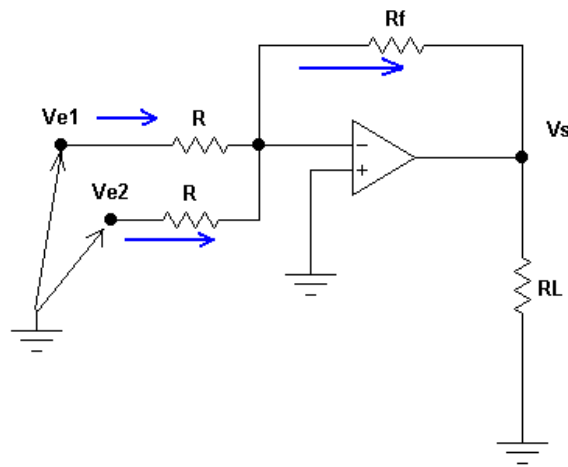


Figura A6-Resistências de entrada iguais

A expressão da tensão de saída em função das entradas é dada por:

$$V_S = -\frac{R_f}{R} \cdot (v_{e1} + v_{e2}) \quad (14)$$

Caso todas as resistências sejam iguais resulta o circuito da figura A7.

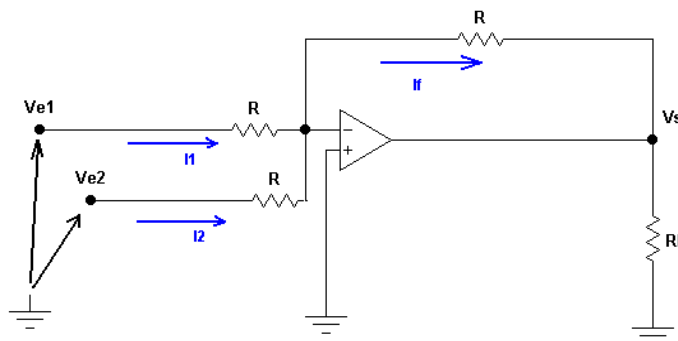


Figura A7-Todas as resistências iguais

A expressão da tensão de saída em função das entradas é dada por:

$$V_S = -(v_{e1} + v_{e2}) \quad (15)$$

A.2.4 Comparador de Zero Não Inversor

Na curva característica do amplificador operacional em malha aberta da figura A8 pode-se verificar que a saída varia linearmente com a entrada se esta se mantiver no intervalo entre $-0,1\text{mV}$ e $0,1\text{mV}$. Fora deste intervalo o amplificador operacional satura.

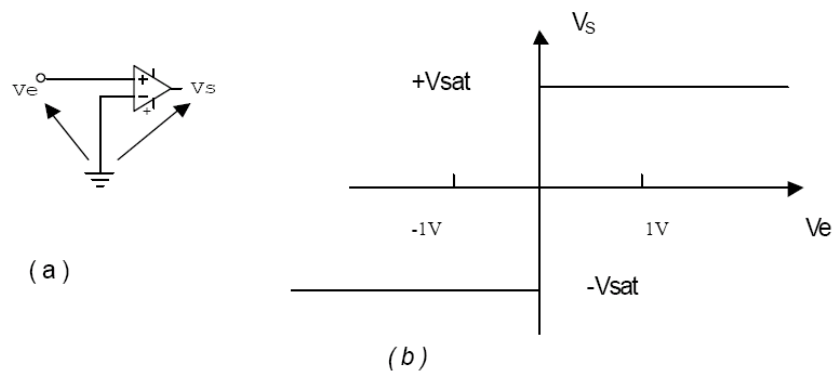


Figura A8-Detector de zero não inversor

O circuito da Figura A8a muitas vezes é chamado de comparador de zero ou detector de zero não inversor porque quando a tensão de entrada passar por zero a saída muda de $+V_{Sat}$ para $-V_{Sat}$ ou vice-versa.

Por exemplo, se $V_e = 4 \cdot \text{Senwt(V)}$ no circuito acima a saída será uma onda quadrada de mesma frequência.

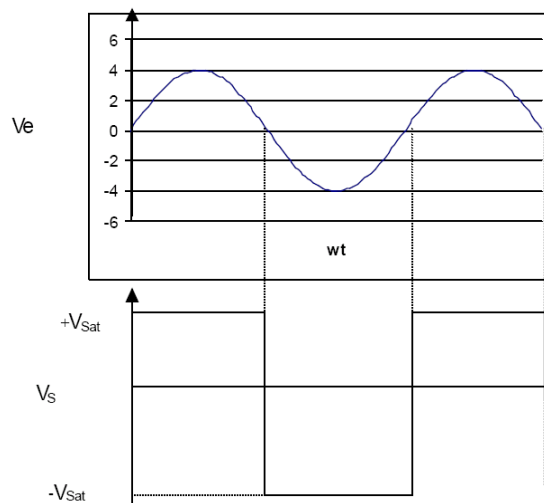


Figura A9-Saída de um detector de zero não inversor

A.2.5 Comparador de Zero Inversor

É semelhante ao circuito não inversor, porém o sinal é aplicado na entrada inversora, como mostra a figura A10.

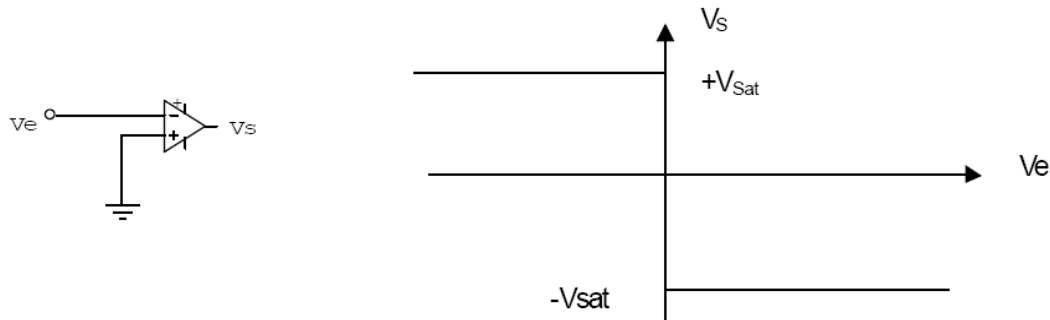


Figura A10-Detector de zero inversor

Se for aplicado um sinal senoidal como $V_e = 4 \cdot \text{sen}(\omega t)$ (V) na entrada do circuito a saída será uma onda quadrada de mesma frequência, mas defasada de 180° em relação à entrada.

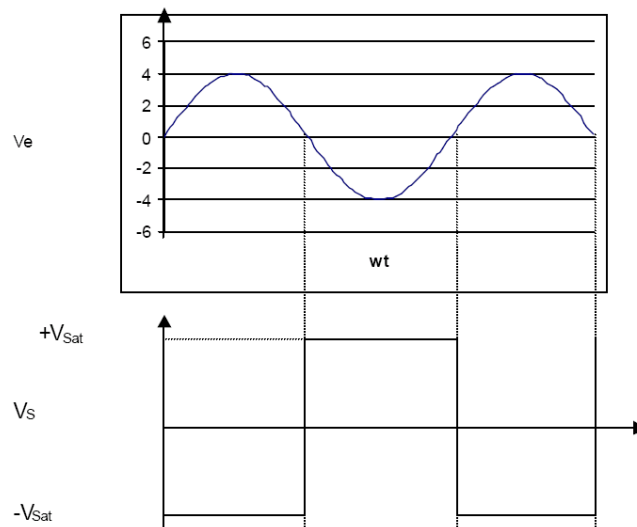


Figura A11-Saída de um detector de zero inversor

A.2.6 Comparador Inversor com Histerese

Por causa do alto ganho os circuitos comparadores anteriores são sensíveis a ruídos. Quando a entrada está passando por zero, se aparecer um ruído na entrada a saída oscilará entre $+V_{Sat}$ e $-V_{Sat}$ até que o sinal supere o ruído. O circuito ligado na saída entenderá que o sinal na entrada do comparador passou varias vezes por zero, quando na realidade foi o ruído que provocou as mudanças na saída. Para evitar isso deve ser colocada uma imunidade contra

ruído chamada de histerese, que em termos de característica de transferência resulta no gráfico da Figura A12.

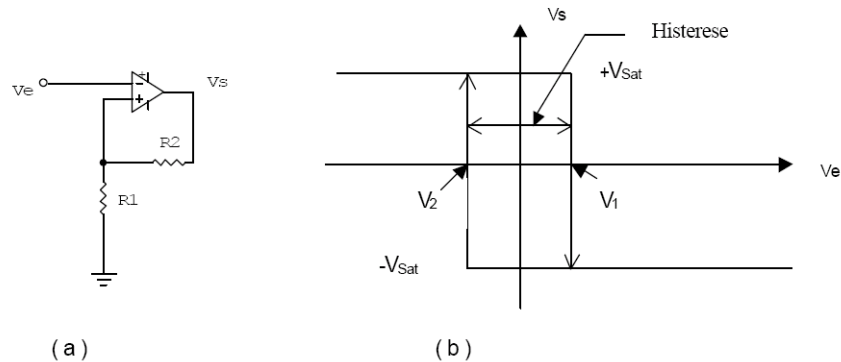


Figura A12-Comparador Inversor com histerese

Observe no circuito da Figura A12a que a realimentação é **positiva**. A realimentação positiva faz com que a mudança de $+V_{Sat}$ para $-V_{Sat}$ ou vice versa seja mais rápida. Os valores das tensões que provocam a mudança da saída são calculados por:

$$V_1 = + \frac{R_1 V_{Sat}}{R_1 + R_2} \quad V_2 = - \frac{R_1 V_{Sat}}{R_1 + R_2} \quad \text{a Histerese} = V_1 - V_2$$

Para mudar de $+V_{Sat}$ para $-V_{Sat}$ a amplitude do sinal deve ser maior do que V_1 e para mudar de $-V_{Sat}$ para $+V_{Sat}$ a amplitude do sinal deve ser menor do que $-V_2$.

Exemplo: Vamos supor que o circuito da Figura A12a tem $V_1 = V_2 = 2V$. Desenhando a forma de onda de saída se a entrada for senoidal e de $4VP$ tem-se:

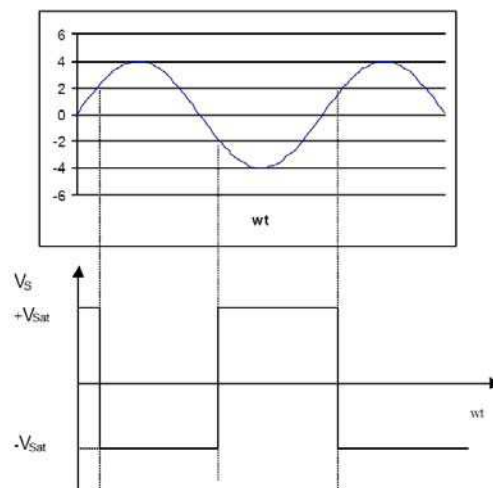


Figura A13-Saída com histerese

Observe que a forma de onda continua a ser quadrada, porém com uma leve defasagem. Quanto maior for o valor de pico da senoide em relação à V_1 e V_2 menor será a defasagem.

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor.

Marcos Antonio Justi

Taubaté, fevereiro de 2009.